



COMMISSION EUROPEENNE

**OFFRE DE SERVICE DANS LE SECTEUR DE LA
COOPERATION RELATIF AU :**

Contrat Cadre EuropeAid/119860/C/SV/Multi

Lot 6 : Environnement

**Pays Bénéficiaire : France
COLLECTIVITE DEPARTEMENTALE DE MAYOTTE**

Lettre de Contrat No. 2009/203776 - Version 1

ETUDE DE LA TYPOLOGIE FORESTIERE DE MAYOTTE

Rapport final

(Gérard Lainé, Stéphane Dupuy, Jacques Tassin & Jean-Michel Sarrailh)

Juillet 2010

Consortium



AGRIFOR Consult

Parc CREALYS, Rue L. Genonceaux 14

B - 5032 Les Isnes - Belgium

Tel : + 32 81 - 71 51 00 - Fax : + 32 81 - 40 02 55

Email : info@agrifor.be

**ARCA Consulting (IT) – CEFAS (GB) - CIRAD (FR) – DFS (DE) – EPRD (PL) -
FORENVIRON (HU) – INYPSA (ES) – ISQ (PT) – Royal Haskoning (NL)**

Les points de vue exprimés dans ce document sont ceux du consultant et ne reflètent pas
nécessairement ceux de l'Union Européenne ou du Gouvernement de Mayotte

SOMMAIRE

CADRE DE L'ETUDE, CONTEXTE	2
RAPPORT FINAL PHASE 1	4
RAPPORT FINAL PHASE 2	83
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	116

CADRE DE L'ETUDE

Le présent rapport s'inscrit dans le projet *Typologie des espaces boisés de Mayotte* dont le pouvoir adjudicateur est le Conseil Général de Mayotte, réalisé conformément à la lettre de commande signée le 22-05-2009 entre le CIRAD et AGRIFOR Consult SA, leader du consortium Agrifor Consult., qui elle-même fait suite à la demande de prestation N° 2009/203776 du contrat-cadre Bénéficiaires EUROPEAID (lot 6 : environnement).

CONTEXTE

D'une superficie totale de 375 km², Mayotte est composée de 2 îles principales, Grande Terre (365 km²) et Petite Terre (10 km²) et de petits îlots non peuplés. Le Mont Bénara culmine à 660m d'altitude sur Grande Terre.

La consommation des ressources naturelles et de biens d'importation augmente non seulement du fait de la croissance démographique (la population sur 17 communes est en effet passée de 46 965 habitants en 1978 à 160 265 en 2002 et 180 000 habitants estimés en 2006), mais également à travers la modernisation des modes de vie et le développement des investissements infrastructurels. Cette situation peut s'avérer très rapidement critique dans un espace micro insulaire comme l'est celui de l'archipel de Mayotte avec notamment l'érosion des bassins versants, les pollutions organiques et terrigènes issues des activités humaines, les risques accidentels et sanitaires, l'augmentation de la vulnérabilité du lagon.

La Commission Européenne vient compléter les efforts du Conseil Général de Mayotte en matière d'environnement et de développement durable, par la mise en œuvre de programmes favorisant la complémentarité des compétences communales, intercommunales et départementales avec le drainage et l'assainissement des eaux pluviales, le reboisement des padzas (zones d'érosion) et la gestion des déchets.

Les peuplements naturels forestiers et agroforestiers de l'île sont très divers alliant forêt tropicale sèche et forêt tropicale humide. La distribution et la composition des formations végétales sont fortement influencées par le relief de l'île et en particulier par la pluviométrie. L'ensemble de ces formations sont plus ou moins secondarisées et dégradées sous l'effet de la pression anthropique.

Peu de données récentes existent sur la filière bois. On peut distinguer différents produits : bois d'œuvre, bois énergie sous forme de bois brut pour la consommation domestique, la filière vanille (échaudage), la filière ylang ylang (distillation), la production de sel à Bandré et sous forme de charbon de bois (véritable filière clandestine installée).

Les dernières zones « refuge » de la végétation originelle de Mayotte (évaluées à 3% du territoire) se rencontrent essentiellement au sein des réserves forestières de la Collectivité qui couvrent près de 5550 ha soit 15% du territoire. Ces réserves englobent les principaux reliefs de l'île (monts Bénara, mont Choungui, mont M'tsapéré et le mont Hachiroungou).

Les peuplements naturels forestiers et agroforestiers de l'île n'ont fait l'objet d'aucune identification cartographique précise et détaillée à ce jour.

Ils sont soumis aux dispositions du code forestier applicable à Mayotte : la gestion des réserves forestières (dont ¼ appartiennent à l'Etat) relève du Service des Ressources Forestières (SRF) de la Direction de l'Agriculture et des Ressources Terrestres et Maritimes (DARTM). La Collectivité Départementale de Mayotte (CDM) en assure la protection, la

gestion et la valorisation (y compris les missions régaliennes). Pour sa part l'Etat assure les missions régaliennes sur le reste du territoire.

Depuis plus de 15 ans, des opérations de reboisement ont lieu sans stratégie bien définie par manque d'outils et de recul.

OBJECTIFS

L'objectif global du projet dont ce contrat fait partie est le suivant :

- protection du patrimoine naturel, des ressources et du cadre de vie, amélioration de la sécurité des personnes et des conditions sanitaires.

L'objectif spécifique du présent contrat est d'obtenir un outil d'aide à la décision en matière de :

- Lutte contre l'érosion des sols avec la réhabilitation par reboisement des zones érodées dénommées « padzas » en fonction des enjeux de protection du lagon et de la ressource en eau ;
- Protection des espaces naturels remarquables ou menacés à l'échelle insulaire ;
- Définition de la politique forestière de la CDM (élaboration des documents d'aménagement pour les forêts publiques).

RESULTATS ATTENDUS

Il s'agit de la réalisation d'une typologie des espaces boisés de Mayotte (phase 1) ainsi que l'étude dans le temps de l'évolution de ces espaces boisés (phase 2).

Par définition, l'étude recouvre l'ensemble des espaces naturels (forêts, mangroves, zones agro-forestières et espaces érodés) du domaine terrestre de Mayotte. Seules les zones urbanisées ne seront pas incluses dans le champ géographique de l'étude.

OBJET DU RAPPORT

Le présent rapport regroupe les rapports finaux des phases 1 et 2

TYPOLOGIE DES ESPACES BOISES DE MAYOTTE

Rapport final de la phase 1

METHODOLOGIE APPLIQUEE
ET NOMENCLATURE RETENUE

Gérard Lainé, Stéphane Dupuy,
Jacques Tassin & Jean-Michel Sarrailh



Les points de vue exprimés dans ce document sont ceux du consultant et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union Européenne ou du Gouvernement de Mayotte

OBJET DU RAPPORT	7
PREMIERE PARTIE : METHODOLOGIE PROPOSEE POUR L'ETUDE AVANT LA PHASE DE TERRAIN	8
1. – PREMIÈRE MISE AU POINT RÉALISÉE LORS DE LA MISSION INITIALE DE CADRAGE DE L'ÉTUDE (PHASE 0)	8
1.1.– PLANNING DE LA PRESTATION	8
1.2. – AFFINAGE DE LA MÉTHODOLOGIE APPELÉE À ÊTRE UTILISÉE POUR LA PHASE 1	9
1.3. – INVENTAIRE DES DONNÉES ET INFORMATIONS INDISPENSABLES À LA MISE EN ROUTE DU PROJET	11
1.3.1. – Données satellitaires utilisables	11
1.3.2. – Orthophotographies IGN.....	12
1.3.3. – Modèle Numérique de Terrain.....	12
1.3.4. – Système de projection.....	12
1.3.5. – Choix du logiciel de traitement numérique d'images.....	12
1.3.6. – Données complémentaires fournies par le SRF et la DAF.....	12
2. – MÉTHODOLOGIE RETENUE POUR LA PHASE DE TERRAIN N°1 (OCCUPATION DU SOL).....	13
2.1. – OBJECTIFS	13
2.2. – PRÉTRAITEMENTS.....	13
2.3. – ETABLISSEMENT D'UNE PRÉ-TYPOLOGIE.....	13
2.4. – STRATIFICATION ET PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE	15
2.5. – MATÉRIEL ET SUPPORTS D'ENQUÊTE	16
3. – MÉTHODOLOGIE RETENUE POUR LA PHASE DE TERRAIN N2 (RELEVÉS FLORISTIQUES EN RÉSERVES FORESTIÈRES).....	19
3.1. – MÉTHODOLOGIE UTILISÉE ET PRODUITS ATTENDUS.....	19
3.2. – FICHES DE RELEVÉS	19
4. – BILAN DES PREMIERS RELEVÉS DE TERRAIN ET CALAGES MÉTHODOLOGIQUES	24
4.1. – MODALITÉS DE RELEVÉS DE TERRAIN	24
4.2. – POTENTIALITÉS ET LIMITES DES DONNÉES-IMAGE UTILISÉES.....	27
4.2.1. – Compositions colorées retenues pour les images satellites : intérêt du MIR	27
4.2.2. – Ancienneté de l'image 2005.....	28
4.2.3. – Résolution spatiale des images SPOT 4 et SPOT 5	28
4.2.4. – Orthophotos.....	28
4.2.5. – Effets d'ombrage	30
4.3. – DONNÉES COMPLÉMENTAIRES À INTÉGRER	30
4.3.1. – MNT et MNE à 1 m.....	30
4.3.2. – Intérêt de disposer d'un MNH.....	30
4.3.3. – RAPAM.....	30
4.3.4. – Zones urbaines.....	30
4.4. – PREMIERS CALAGES MÉTHODOLOGIQUES EN CONCERTATION AVEC LE SRF	31
4.4.1. – Grain d'analyse et priorités d'investigation.....	31
4.4.2. – Distinction des principaux postes typologiques.....	32
4.4.3. – Cas des padzas	33
4.4.4. – Nature du sol dans les zones érodées	33

DEUXIEME PARTIE : PRINCIPES D'ELABORATION DE LA TYPOLOGIE PROPOSEE ET RESULTATS OBTENUS.....	34
1. – CHOIX DES PRINCIPES DE L'ÉLABORATION.....	34
1.1. – EVOLUTION DE NOTRE APPROCHE.....	34
1.2. – INTÉRÊT D'UNE APPROCHE QUANTITATIVE.....	38
1.3. – EXEMPLES D'APPROCHES SIMILAIRES ET CONTRAINTES RESPECTIVE	38
1.4. – CHOIX DES DEUX CRITÈRES : MÉDIANE ET ÉCART-TYPE.....	39
1.5. – CHOIX DES SEUILS ASSOCIÉS AUX CRITÈRES RETENUS	39
1.5.1. – Seuil de hauteur.....	40
1.5.2. – Seuil d'hétérogénéité (ou d'écart-type).....	41
2. – MISE EN ŒUVRE DU TRAITEMENT NUMÉRIQUE.....	43
2.1. - PRÉTRAITEMENT	42
2.1.1. – Images satellitaires.....	42
2.1.2. - Photographies aériennes.....	42
2.1.3. – Modèle Numérique de Hauteur	42
2.2. – PREMIERS ESSAIS DE CLASSIFICATION NUMÉRIQUE	43
2.2.1. – Essais de classification pixel à pixel et choix de la méthode objet.....	43
2.2.2. – Difficultés rencontrées lors des classifications numériques faisant intervenir des images et des orthophotos.....	43
2.3. - MÉTHODOLOGIE RETENUE POUR LA CLASSIFICATION	44
2.3.1. – Principes de la classification en mode objet	45
2.3.2. – Premier niveau de segmentation	46
2.3.3. – Classification.....	48
2.3.4. – Fusion.....	49
2.3.5. – Création de couches thématiques complémentaires par PIAO	50
2.3.6. – Compléments apportés aux couches « zones urbaines » et « tannes » fournies par la DAF.....	51
2.3.7. – Second niveau de segmentation.....	52
2.3.8. – Classification.....	53
2.3.9. – Post-classification numérique	54
2.3.10. - Post-classification manuelle	55
2.3.11. – Définition des postes de la typologie	56
3. – PRODUITS LIVRES	59
3.1. – DONNÉES ORTHORECTIFIÉES ET MOSAÏQUÉES	59
3.2. – PRODUITS DÉRIVÉS.....	59
3.3. – PRODUITS CARTOGRAPHIQUES NUMÉRIQUES	60
3.4. – PRODUITS CARTOGRAPHIQUES PAPIER	69
3.5 - PRODUITS STATISTIQUES.....	69
4. – VALIDATION DE LA DÉMARCHE	73
4.1. – POINTS DE CONTRÔLE.....	73
4.2. – MISE EN RELATION AVEC LES RELEVÉS DE VÉGÉTATION SUR PLACETTES ET APPRÉCIATION DE LA PERTINENCE DES SEUILS DE HAUTEUR RETENUS	75
5. – FICHES BOTANIQUES	79
BILAN.....	80
BIBLIOGRAPHIE.....	81

OBJET DU RAPPORT FINAL DE LA PHASE 1

Ce rapport clôt la phase 1 « Typologie des espaces naturels ».

La première partie reprend la méthodologie proposée pour cette étude avant la phase de terrain telle qu'elle a été affinée au cours des différentes réunions qui se sont tenues depuis le mois de juin et qu'elle a été exposée avant la phase de terrain débutant mi-août 2009. Elle correspond à l'équivalent du rapport 1 initialement mentionné dans les termes de référence. Elle est complétée par les remarques mentionnées au maître d'œuvre à l'issue de la première mission de relevés.

La seconde partie porte sur la nomenclature de la typologie retenue et les résultats obtenus. Elle rappelle en introduction l'important changement intervenu dans la méthodologie suite à la demande du SRF formulée fin octobre 2009 de tester les possibilités complémentaires offertes par le traitement numérique des données du Modèle Numérique de Hauteur (MNH) à 1m de résolution spatiale.

Dans les pages qui suivent, nous reprenons l'ensemble du déroulement méthodologique que nous avons suivi au cours du temps.

<p style="text-align: center;">PREMIERE PARTIE : METHODOLOGIE PROPOSEE</p> <p style="text-align: center;">POUR L'ETUDE AVANT LA PHASE DE TERRAIN</p>
--

1. – Première mise au point réalisée lors de la mission initiale de cadrage de l'étude (phase 0)

Cette mission a été réalisée à Mayotte entre le 9 et le 13 juin 2009, le plus tôt possible après la date de démarrage officiel du contrat (24 mai 2009).

Elle a permis une analyse du contexte, la présentation et le recueil des informations, des documents et des données existantes, ainsi qu'une première approche du terrain (Bénara, Sohoa, Saziley). Le cadrage de l'étude a été effectué à partir des besoins exprimés et précisés par le Chef du Service des Ressources Forestières (SRF) du Conseil général, mais aussi des impératifs de calendrier (délais incompressibles de livraison des données IGN, saison des pluies). Les discussions et échanges avec ce service, mais aussi avec les différents acteurs impliqués dans cette étude ou intéressés par les résultats attendus, ont permis de beaucoup mieux en cerner les contours et d'en appréhender les objectifs.

1.1. – Planning de la prestation

La date de début de l'étude est, comme précisé plus haut, le 24 mai et sa durée initiale était de 8 mois. Mais compte tenu du retard de 3 semaines dans le démarrage de cette étude et du délai incompressible de livraison des produits IGN, la durée de la phase 1 a été allongée, à coût constant, de 2 mois et une semaine. La durée indicative de la phase 1 a donc été portée à 10 mois et une semaine et la fin du projet au 31 juillet 2010.

De plus, il a été décidé de programmer la première mission terrain plus tôt que dans le calendrier initial, de façon à pouvoir disposer ensuite d'un délai suffisant à Montpellier pour en dépouiller les résultats et traiter les données avant la mission suivante programmée obligatoirement en octobre (avant le démarrage de la saison des pluies).

De ce fait, il a été décidé que le rapport 1, qui devait être la présentation sur une zone-test de la méthodologie appliquée et de la nomenclature de la typologie retenue, se limiterait à la présentation de la méthodologie affinée de l'étude en comité technique avant la phase de terrain.

1.2. – Affinage de la méthodologie appelée à être utilisée pour la phase 1

Ci-après, nous rappelons brièvement les *termes de référence* relatifs à la phase 1 (point 2.3.2).

- Il s'agit d'assurer la « réalisation d'une typologie des espaces boisés de Mayotte ». L'objectif de la première phase « est d'obtenir une typologie des différents espaces naturels selon une nomenclature détaillée et pertinente avec la réalité de terrain ». Ce travail comporte trois étapes étroitement liées :
- « Une étape comprenant le travail de pré-cartographie basé sur la segmentation et les propositions de classification issues du traitement et de l'analyse de l'imagerie satellitaire SPOT 2005, 2007 ou 2009¹ ».
- « Une étape de photo-interprétation des orthophotographies aériennes de l'IGN (campagne 2008) qui constituera le référentiel géographique pour l'établissement de la cartographie typologique en raison de sa définition. L'analyse spectrale des clichés satellitaires permettra d'affiner la pré-typologie ainsi définie. Elle s'appuiera pour partie sur les résultats de la segmentation de la première étape² ».
- « Une étape de missions de terrain dont l'objectif principal est d'affiner, caractériser et valider la nomenclature de la typologie. Pour des raisons de faisabilité l'échantillonnage se fera essentiellement le long des voies d'accès (routes, pistes, chemins) en réalisant des transects le long desquels on étudiera sur des parcelles de 100 m² (10mx10m), la structure des formations ».

Cette étape devait permettre également de constituer une photothèque.

Le point 2.4.2. précise : « La nomenclature de la typologie ne peut être précisée en détails *a priori*. Elle dépend conjointement des résultats de l'analyse de l'imagerie satellitaire affinée par la photo-interprétation de l'orthophotographie IGN et des résultats liés aux étapes de terrain. Le croisement de ces informations permettra de définir les différents postes typologiques. Il est attendu que la typologie retenue qui sera discutée et arrêtée en comité technique de suivi avec le titulaire de l'étude, puisse préciser et caractériser les principaux postes thématiques sur la base suivante :

- Les formations naturelles à dominante boisée ;

Il ne s'agit pas de caractériser des habitats (travail confié au CBNM) mais de différencier des faciès dans les formations. Par exemple : Forêt mésophile peu perturbée à dominante Famelo (*Chrysophyllum boivinianum*) et Maroudi mena (*Filicium decipiens*), forêt mésophile sous *Adenanthera pavonina*...

L'unité minimale de collecte (UMC) permettant la cartographie de ces formations sera inférieure ou égale à 0.25 ha (largeur minimum 25 m).

- Les formations issues de boisements et reboisements ;

¹ Disponibles au SRF.

² Il a été précisé que ces deux étapes 1 et 2 (analyse de l'imagerie satellitaire et photo-interprétation de l'orthophotographie IGN) ne seraient pas successives mais bien à mener en parallèle.

Les boisements et reboisements et particulièrement ceux réalisés à base d'*Acacia mangium* dans le cadre de la réhabilitation des zones érodées devront pouvoir être identifiés jusqu'au stade de bas-perchis.

L'unité minimale de collecte permettant la cartographie de ces formations sera de l'ordre de 0.10 ha (largeur minimum 10 m).

➤ Les formations végétales à caractère spécifique ;

L'étude devra permettre également de différencier les formations spécifiques caractérisées par un degré de recouvrement et d'envahissement remarquables comme pour le cas des formations à base de liane "*saba comorensis*". Ces formations sont essentiellement situées dans le domaine forestier des réserves forestières de la Collectivité.

L'unité minimale de collecte permettant la cartographie de ces formations sera de l'ordre de 0.10 ha (largeur minimum 10 m).

➤ Les formations des zones érodées (padzas) ;

La typologie utilisée devra permettre d'identifier les zones érodées selon le type de couverture ou la nature du sol nu (*Sol nu à semi-nus, graminées, fougères, arbustes*).

L'unité minimale de collecte permettant la cartographie de ces formations sera de l'ordre de 0.20 ha (largeur minimum 20 m).

➤ Les espaces agroforestiers et agricoles ;

Dans le cadre de l'analyse multispectrale, toutes informations susceptibles de qualifier le type d'occupation sur le plan agroforestier et agricole seront également exploitées. Toutefois, compte tenu de la complexité de ces formations et associations végétales tant en nature qu'en répartition spatiale, il sera retenu que l'unité minimale de collecte permettant la cartographie de ces espaces sera de l'ordre de 1 ha (largeur minimum 50 m) ».

1.3. – Inventaire des données et informations indispensables à la mise en route du projet

1.3.1. – Données satellitaires utilisables

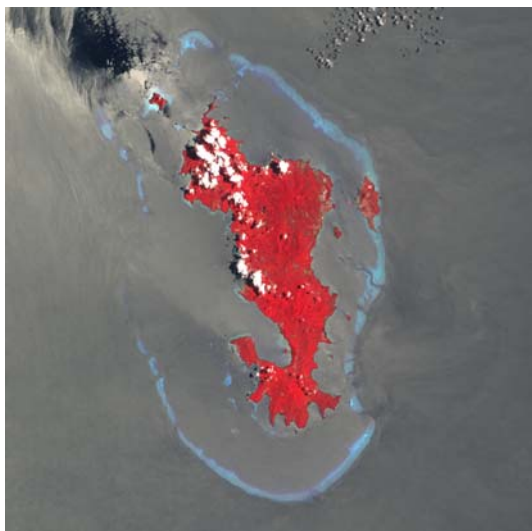


Figure 1 : Dans notre premier rapport de mission, nous écrivions : « L'image SPOT 5 de 2009 (en cours de programmation) ne pourra être utilisée comme référence que si la couverture nuageuse permet d'acquérir une image au plus tard pendant le mois de juin. Sinon l'image SPOT 5 du 30 juin 2005 (à 10m de résolution) servira de base à cette étude.

Pour les quelques zones nuageuses situées au Nord ouest de l'île, il sera nécessaire de recourir à l'image SPOT de 2002 qui comme l'image de 2007 (ci-contre) est une image SPOT4 à 20m de résolution mais qui présente le double avantage d'être moins nuageuse et d'avoir été acquise à la même période de l'année que celle de 2005. »

Image SPOT 4 du 16/10/2007



Image SPOT 4 du 10/06/2002

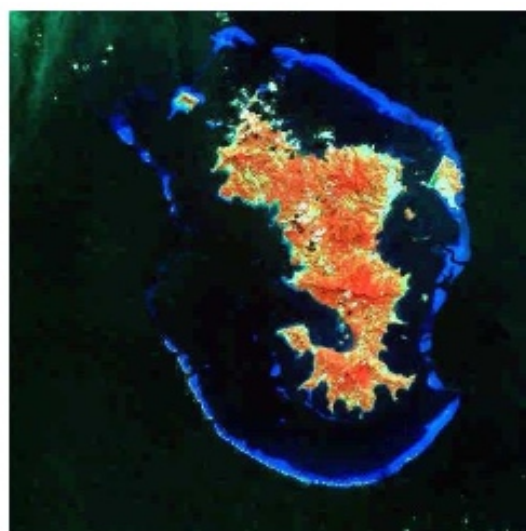


Image SPOT 5 du 30/06/2005

1.3.2. – Orthophotographies IGN

La BD Ortho IGN 2008 a été livrée mi-juillet 2009. Une des priorités a donc été de confectionner rapidement les tirages papier correspondants aux secteurs retenus pour la mission de terrain.

1.3.3. – *Modèles Numérique de Terrain et de Hauteur à 10m*

Le MNT 2008, beaucoup plus précis (acquisition par lidar) que le MNT 2003, était nécessaire au démarrage de l'étude pour effectuer l'orthorectification des images. La demande de procédure négociée avec l'IGN a été faite auprès de la DCE. Une première version de ce MNT, apportée par le Directeur Général Adjoint de l'IGN lors de la signature de la convention Litto 3D le 10 juin 2009, devait nous permettre de commencer le travail en attendant la version finale.

En réalité, nous n'avons pu récupérer ces données à 10m de résolution, transmises par le SRF, que courant juillet 2009.

1.3.4. – Système de projection

Il a parallèlement été demandé aux différents acteurs rencontrés, après consultation préalable, de communiquer dès que possible au prestataire le système de projection à utiliser (Combani 50, WGS 84 ou RGM 04) afin de pouvoir commencer le travail le plus rapidement possible.

1.3.5. – Choix du logiciel de traitement numérique d'images

Face à la complexité du sujet, à la précision demandée et aux nombreuses confusions radiométriques mises en évidence lors des premiers essais de classification pixel à pixel, c'est le logiciel e-cognition Developer qui, en raison de ses possibilités en approche objet, a été retenu en priorité par l'équipe du CIRAD basée à Montpellier à la Maison de la Télédétection.

1.3.6. – Données complémentaires fournies par le SRF et la DAF

Un certain nombre de couches d'information établies ou disponibles en interne ont été mises à notre disposition pour la durée de l'étude par le SRF (limites administratives, limites des réserves, des aires protégées, voies de communication, pistes, GR et autres sentiers, hydrologie, morphopédologie...) et par le Service Statistiques Agricoles de la DAF (couche RAPAM : Registre de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Aquaculture de Mayotte).

2. – Méthodologie retenue pour la phase de terrain N°1 (occupation du sol)

2.1. – Objectifs

Il s'agissait, au cours d'une première mission réalisée du 16 août au 3 septembre 2009, de recueillir de premières informations fiables et géoréférencées sur l'occupation du sol de sites échantillons répartis sur l'ensemble du territoire, correspondant à différentes situations climatiques mais aussi à différents faciès radiométriques et texturaux. Le but était de disposer d'un ensemble solide et représentatif de données d'apprentissage pour l'interprétation visuelle ultérieure des orthophotographies et le choix des combinaisons spectrales les plus adaptées à la classification des données satellitaires SPOT. Cette mission constituait en outre la seule opportunité dans le calendrier du projet d'effectuer des relevés *en milieu de saison sèche*.

2.2. – Prétraitements

Ces travaux ont été effectués après réception des données IGN dès que nous avons eu connaissance du système de projection retenu pour l'étude et des paramètres de transformation correspondants :

- Création du MNT à 1m ;
- Ortho-rectification des images Spot fournies ;
- Importation (format *shape*) et reprojection des couches vecteur recueillies (morphopédologie, voies de communication, limites administratives etc.) afin de les rendre superposables aux images ;
- Réception et préparation des photographies aériennes ;
- Préparation des documents terrain (impression des images Spot et des orthophotos) ;
- Préparation et intégration au GPS d'un formulaire d'enquête.

2.3. – Établissement d'une pré-typologie

Afin de faire un point sur la diversité des situations, nous avons préalablement établi une pré-typologie des différents types d'occupation du sol susceptibles d'être rencontrés, et telle que nous l'avions initialement envisagée sur la base des éléments d'information dont nous disposions avant de conduire nos missions de terrain.

Bien que nettement influencée par la définition et l'importance accordée aux différents postes thématiques dans les termes de référence (ex : pas de différenciation entre les différents espaces agricoles), *cette pré-typologie présentée en tableau 1 ne préfigurait en aucun cas le type de classification qu'il nous revenait de fournir en fin de phase 1*. Elle constituait simplement une aide à la description des sites échantillons lors des relevés de terrain, qui ne pouvait attendre bien entendu la version définitive de notre typologie, d'autant moins qu'il allait s'avérer par la suite que l'essentiel de la typologie serait défini sur la base d'une classification numérique.

Tableau 1 : Eléments de la pré-typologie, réunissant 34 types d'occupation des sols définis *a priori* dans le dessein de grouper nos premières observations réalisées sur le terrain dès notre première mission.

				Moyenne altitude	Crête (1)
				Basse altitude	Versant (2)
Végétation naturelle	Espaces forestiers	Forêt humide	Primaire		Crête (3)
					Versant (4)
		Forêt sèche	Secondaire (5)		
			Primaire (6)		
	Autres		Secondaire (7)		
		Zone enliannée (8)			
		Bambous (9)			
		Lantana (10)			
		Ripisylve (11)			
		Cordon littoral (12)			
	Espaces littoraux	Mangrove	Externe (13)		
			Interne (14)		
		Forêt marécageuse (15)			
		Tanne (16)			
		Prairie humide (17)			
		Formation sclérophylle (18)			
Végétation anthropique	Non cultivée	Savane herbeuse (19)			
		Fourré	Humide (20)		
	Cultivée		Secondaire (21)		
		Reboisement	Ancien (22)		
			Récent (23)		
		Agroforesterie	Mésophile (24)		
			Sèche (25)		
		Autres espaces agricoles (26)			
Formes d'érosion	Padza	Espaces verts non agricoles (27)			
		Sol nu (28)			
		Graminées (29)			
		Fougères (30)			
		Ligneux (31)			
Aménagements	Autres formes d'érosion (32)				
	Carrière (33)				
	Mare-Étang (34)				

2.4. – Stratification et plan d'échantillonnage

Nous avons en premier lieu procédé à une stratification écologique simple afin de prendre en compte la diversité bioclimatique des situations (4 classes de températures et 3 classes de précipitation).

Tableau 2 : Stratification en 12 strates théoriques à partir des deux critères principaux : altitude et précipitations. Exemples de sites représentatifs de chacune des strates (trois strates sont sans objet)

P (mm/an)	Altitude (m)			
	0-150	150-300	300-450	>450
<1200	SE, Pte Terre	SE (N de Mbouini)	(non défini)	(non défini)
1200-1700	Acoua	Choungui	Mlima choungui	(non défini)
>1700	Sohoa	Mtsamboro	Hachiroungou	Mtsapere, Benara

Nous avons procédé comme suit :

- Un même nombre d'échantillons (environ 60) a été associé à chacune des strates.
- Pour une strate donnée, ils ont ensuite été positionnés par choix raisonné de façon à couvrir si possible :
 - différents types d'occupation du sol (cf. postes de la pré-typologie ci-dessus), et en général des secteurs boisés présentant une variabilité maximale ;
 - un maximum de faciès observés sur les images et les photos aériennes ;
 - différentes situations observées sur les autres couches d'informations dont nous disposons (différentes hauteurs de végétation, intérieur et extérieur de réserve, densité du parcellaire agricole etc.).

Il a été également tenu compte des contraintes d'accessibilité en s'appuyant sur les couches relevant des voies de communication et chemins.

Lors de la réunion du 17 août 2009, la carte des sites-échantillons pressentis a donné lieu à quelques réajustements, liés notamment :

- A un léger sur-échantillonnage des Crêtes du Nord, au détriment du Bénara et de Combani (voir figure 1 ci-dessous) ;
- A l'intérêt de mieux prendre en compte les zones enlignées.

Le positionnement final des sites-échantillons a alors été établi jour par jour et les déplacements ont été planifiés en fonction de la disposition des sites-échantillons et de la disponibilité d'agents de terrain invités à accompagner les experts sur le terrain.

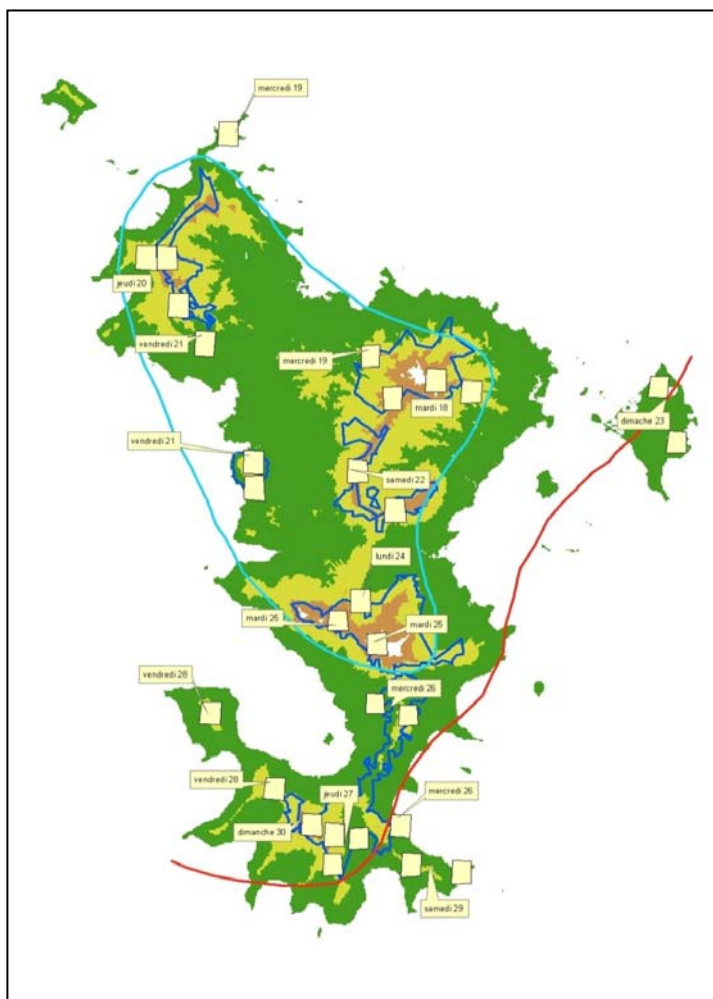


Figure 1 : Positionnement des sites-échantillons positionnés en préparation de la mission. Le positionnement de certains sites a été modifié en début de mission sur les recommandations du responsable du SRF.

2.5. – Matériel et supports d'enquête

- 2 GPS Trimble
 - o Le premier GPS enregistrait le trajet suivi afin de pouvoir retrouver les zones visitées et géolocaliser les photos (logiciels utilisés (Noni sur le GPS, GPISync pour la géolocalisation).
 - o Le second, équipé du logiciel Arc Pad, était utilisé pour la saisie des sites échantillons visités et la mise à jour d'une base de données géographiques grâce à des formulaires spécialement conçus pour l'étude et implantés sur l'appareil avant la mission. Les différentes images satellites ainsi que les couches vecteurs pouvaient également être visualisées à l'échelle désirée sur le terrain.

**Figure 2 : - Modalités retenues pour les différents champs (à gauche)
- Copie d'écran d'une interface de saisie (à droite)**

ID_PARCELLE

DATE : Automatique

COMMUNES : Acoua, Bandraboua, Bandrele, Bouéni, Chiconi, Chirongui, Dembeni, Dzaoudzi, Kani-Kéli, Koungou, Mamoudzou, Mtsamboro, M'Tsangamouji, Ouangani, Pamandzi, Sada, Tsingoni

RESERVE : Bénara, Crêtes du Nord, Crêtes du Sud, Majimbini, Sohoa, Songoror Mbili

TYPE_PLACETTE : 10m, 20m, 25m, 50m, Point

TOPOGRAPHIE : Talweg, Mi-pente, Crête

PENTE : Faible, Moyenne, Forte

VERSANT : Nord, Sud, Est, Ouest

COULEUR_SOL : Blanc, Jaune, Rouge, Brun, Gris, Noir

LITIERE_SOL : Absente, Eparsée, Dense

HYDROMORPHIE : Absente, Signes, Marquée

EROSION : Faible, Moyenne, Forte

ROCHE : 0-19%, 20-39%, 40-59%, 60-79%, 80-100

COULEUR_ROCHE : Claire, Colorée, Foncée

RUGOSITE : Lisse, Légèrement rugueuse, Moyennement rugueuse, Fortement rugueuse

PRETYPO_PEUP : Forêt humide moy crête, Forêt humide moy versant, Forêt humide bas crête,

Forêt humide bas versant, Herbes et fourrés mésophiles, Forêt secondaire hum, Reboisement ancien, Reboisement récent, Forêt secondaire sèche, Fourré sec, Liane, Bambou, Ripisylve, Formations de cap, Taillis Lantana, Cordons littoraux, Savane herbacée, Mangrove ext, Mangrove int, Tanne, Forêt marécageuse, Padza nu, Padza + graminée, Padza + fougère, Padza + ligneux, Autre zone érodée, Agroforêt mésophile, Agroforêt sèche, Espaces agricoles

HERBE : Oui, Non

FOUGERES : Oui, Non

MOUSSE_LICHEN : Oui, Non

COUL_VEG_NON_LIGN : Vert, Jaune, Rousse

STRATE_DOMINANTE : 0-19%, 20-39%, 40-59%, 60-79%, 80-100

DEFOLIATION : 0-19%, 20-39%, 40-59%, 60-79%, 80-100

REBOISEMENT : *Acacia mangium*, Badamier, Filao, Limba, *Samanea saman*, Takamaca, Rebois1, Rebois2, Rebois3

LIANES : 0-19%, 20-39%, 40-59%, 60-79%, 80-100

LIANES_POSITION : Au sol, Buissons, Troncs, Canopée

LIANES_ESPECES : *Saba comorensis*, *Entada rheedii*, Vahy be, Liane1, Liane2, Liane3

PESTES : Agave, Chitsangou, Lantana, Vigne maronne, Peste1, Peste2, Peste3

AGRICULTURE : Autres fruitiers, Banane, Cocotier, Jachère très récente, Jardin de case,

Maraichage, Prairies, Serre, Vanilleraie, Vivrier, Ylang-Ylang,

Agriculture1, Agriculture2, Agriculture3, Agriculture4

OBSERVATIONS :

Propriété	Valeur
ID_PARCELLE	31
Date	2009-08-19 09:48:44
COMMUNES	<Nub>
RESERVE	<Nub>
Type_de...	Point
TOPOGR...	<Nub>
PENTE	Faible
VERSANT	Sud
COULEU...	<Nub>
LITIERE...	Dense
HYDROM...	Absente
EROSION	Faible
ROCHE	0-19%
COULEU...	<Nub>
RUGOSITE	<Nub>
PRETYP...	Reboisement ancien
HERBE	Non
FOUGER...	Non
MOUSSE...	Non
COUL_VE...	Vert
STRATE...	60-79%
DEFOLIA...	60-79%
REBOISE...	Badamier
LIANES	0-19%
LIANES...	<Nub>
LIANES...	<Nub>
PESTES	<Nub>
AGRICUL...	<Nub>
SITE	<Nub>
OBSERV...	<Nub>
Points_pa...	Aucun
INDIVIDUS	Aucun
PHOTOS	1 Enregistrement

- Orthophotographies IGN de novembre 2008

- Impressions en couleurs naturelles format A4 au 1/5 000, qui ont permis d'interpréter les signaux visuels les plus immédiats s'agissant des types de végétation ou, parfois, de certaines espèces (tableaux 2 et 3).
- Impressions en fausses couleurs format A1 au 1/25 000.

- Images satellitaires

- Les deux images retenues ont été l'image SPOT 5 du 30 juin 2005 et l'image SPOT 4 du 17 août 2001, choisie en raison de sa période d'acquisition en phase avec celle de la mission.
- Les supports papier utilisés étaient des impressions au 1/25 000 des compositions colorées PIR-MIR-R en RVB pour chacune des dates (2 fois 5 coupures).

3. – Méthodologie retenue pour la phase de terrain N°2 (relevés floristiques en réserves forestières)

Les relevés floristiques ont été réalisés pour la plupart au cours de la seconde mission de terrain réalisée à Mayotte du 11 au 28 Octobre 2009 : du 11 au 25 par Jean-Michel SARRAILH et Jacques TASSIN, rejoints du 21 au 28 par Gérard LAINÉ.

L'essentiel de cette seconde mission a consisté à assurer le recueil de données destinées à renseigner, par leur structure et leur composition floristique, les postes typologiques identifiés. Cette démarche devait permettre de caler le modèle de segmentation, en en précisant désormais le contenu. Dans la pratique, et du fait du retard de classification lié à la prise en compte du MNH, ces relevés ont dû être réalisés avant même que cette classification ne fût réalisée. Il ne nous fut donc pas possible d'établir un plan d'échantillonnage qui tînt compte de la distribution effective des types au sein des réserves forestières.

Le second objectif était de recueillir des informations fiables et géoréférencées sur l'occupation du sol dans les zones susceptibles de présenter des reliquats de forêts naturelle en dehors des réserves forestières, dans certaines parties de ces réserves non visitées lors des précédentes missions ainsi que sur certains versants à l'ombre sur les images et les photos aériennes.

Il s'agissait enfin d'affiner la méthodologie et la nomenclature de la future classification en accord avec le SRF et le FED.

3.1. – Méthodologie utilisée et produits attendus

En conséquence, le formulaire utilisé (voir les deux pages suivantes) a distingué deux volets relevant respectivement de la structure et de la composition. L'ensemble des éléments portant sur la structure du milieu (ex : taux de recouvrement à différentes hauteurs) et sur la distribution des hauteurs et des diamètres des arbres, devrait permettre d'identifier comment se distribuent respectivement ces mêmes valeurs au sein des différents postes typologiques identifiés.

Le report des données une fois assuré sur tableur, de retour de mission, il est notamment prévu d'examiner par des analyses multivariées (AFC) si les relevés peuvent être ordonnés selon des gradients écologiques principaux, mais aussi si des données de structure sont liés aux grands traits du milieu. En outre, cette démarche devait permettre d'observer dans quelle mesure la composition floristique diffère (ou non) entre massifs forestiers, mais aussi entre différents sites (ou stations) d'un même massif.

3.2. – Fiches de relevés

Les fiches reproduites ci-après renseignent sur des éléments de composition et de structure verticale et horizontale (taux de recouvrement selon diverses strates de végétation). Les relevés ont été ventilés comme suit :

Bénara : 13 relevés

Combani : 5 relevés

Hachiroungou : 6 relevés

Saziley : 5 relevés

Choungui : 6 relevés

Convalescence : 11 relevés

Majimbini : 9 relevés

Sohoa : 7 relevés

Fiche relevés Mayotte – 1. Formulaire

Caractérisation des postes typologiques forestiers de Mayotte - Octobre 2009

Date : Accompagnateurs : N° relevé :
 N° première photo prise sur le site :

1. Situation

Réserve :
 N° dans la réserve : Poste typologique : Bilan hydrique :
 Coordonnées de la placette : X Alt : Pente : Exposition :
 Y

2. Structure

Surface terrière : Litière au sol : Incorporation litière :
 Couverture végétale au sol :
 Recouvrement ligneux par strates : 0-1 m
 1-2 m Roche apparente :
 2-4 m Sol apparent :
 4-8 m
 8-12 m
 >12 m
 Recouvrement total lianes : Effondrement par lianes :
 Recouvrement total fougères :
 Commentaires sur la structure :
 Oiseaux observés au sein du poste :

3. Composition

N° relevé :

	Nom botanique	Recouv.	D0	H0	N>1m	Régén.		Nom bot.	Rec. au sol	Position
SP1							Lianes :			
SP2										
SP3										
SP4										
SP5										
SP6										
SP7										
SP8										
SP9										
SP10										
SP11										
SP12										
SP13										
SP14										
SP15										
SP16										
SP17										
SP18										
SP19										
SP20										
SP21										
SP22										
SP23										
SP24										
SP25										
SP26										
SP27										
SP28										
SP29										
SP30										

N° dernière photo prise sur le site :

Commentaires sur la composition :

Observations générales :

Fiche relevés Mayotte – 2. Modalités

1. Situation

Bilan hydrique

Symbole	Signification : bilan hydrique	Situation topographique correspondante
-	les départs d'eau sont plus importants que les arrivées donc bilan négatif	Bordure de plateau, haut de versant, milieu de versant convexe ou milieu de versant avec forte rupture de pente (pente supérieure en aval)
0	les départs d'eau sont aussi importants que les arrivées	Milieu de versant, milieu de plateau
+	les arrivées d'eau sont plus importantes que les départs	Bas de versant, milieu de versant concave ou avec forte rupture de pente (pente supérieure en amont)
++	arrivées d'eau des 2 versants et départs faibles d'où un bilan positif fort	Fonds de vallon

Valeur de la pente

0 à 9 %	pente nulle à faible	1
10 à 25 %	pente moyenne	2
26 à 49 %	pente assez forte	3
à 50 %	pente forte	4

2. Structure

Taux de recouvrement :

- Litière au sol ;
- Couverture au sol ;
- Roche apparente ;
- Sol apparent ;
- Recouvrement ligneux par strates ;
- Recouvrement total lianes ;
- Recouvrement total fougères ;
- Effondrement par lianes.

Classes de recouvrement	Signification
0	Absence
1	< de 5%
2	De 5 à 25 %
3	De 25 à 50 %
4	De 50 à 75 %
5	De 75 % à 100 %
6	100 %

D0 : diamètre dominant (diamètre moyen approché des 5 plus gros diamètres)

H0 : hauteur dominante (hauteur moyenne approchée des 5 plus grandes hauteurs)

N>1m : 0, 1-5, 5-10, 10-50, 50-100, >100

Régénér. : 0, 1-5, 5-10, 10-50, 50-100, 100-1000, >1000

Position des lianes : S (Sol), T (Troncs), B (Branches), C (Canopée)

4. – Bilan des premiers relevés de terrain et calages méthodologiques

4.1. – Modalités de relevés de terrain

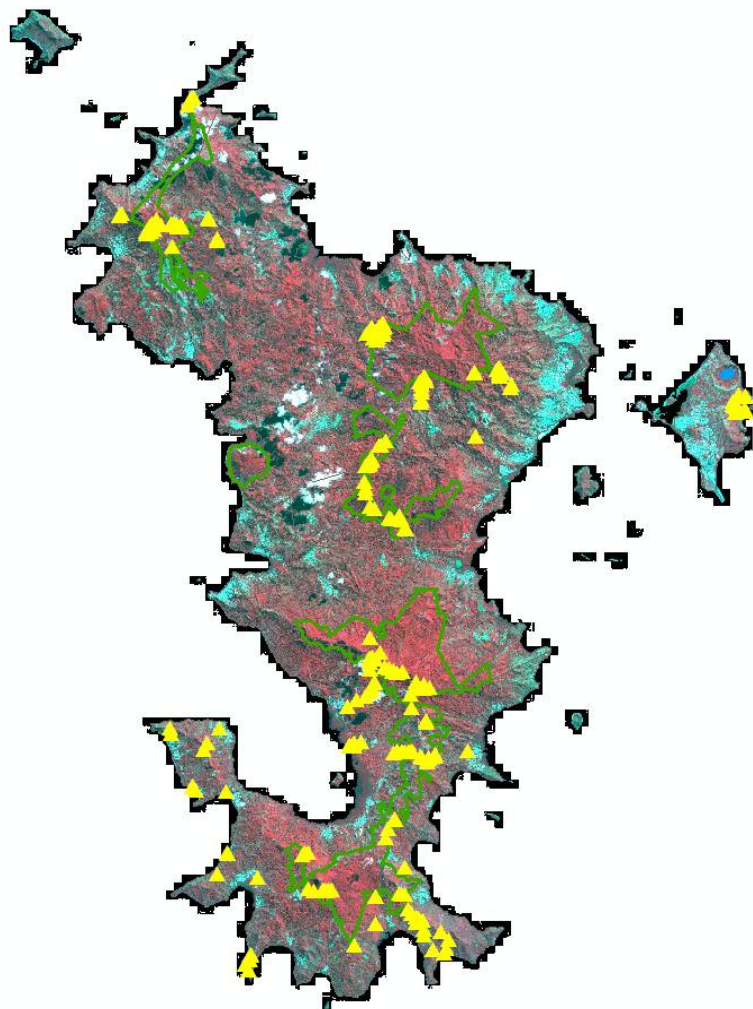
Nous avons respecté autant que possible le plan d'échantillonnage établi en début de mission. Toutefois, nous avons été amenés en cours de mission à procéder à quelques ajustements. Il a été en effet décidé à plusieurs reprises, grâce à l'aide des services forestiers, d'effectuer la traversée totale de massifs, trajets particulièrement intéressants qui permettaient de parcourir différents versants à l'ombre ou ensoleillés au moment des prises de vue, et surtout d'éviter d'effectuer des allers-retours débouchant forcément sur un nombre d'observations plus réduit.

Le récapitulatif des trajets enregistrés par le GPS (certains déplacements n'ont pu être enregistrés pour raison technique) est donné en figure 3, sur laquelle est également représenté leur positionnement, sur fond d'image SPOT 5 de juin 2005. Par ailleurs, en sus de cet échantillonnage, il était indispensable de connaître l'occupation du sol d'une partie des versants à l'ombre sur les images ou les photos, apparaissant de ce fait de manière non lisible sur les supports.



Figure 3 : A gauche : Itinéraires enregistrés par GPS reportés sur fond Google Earth d'orthophotographies mosaïquées.

A droite : Localisation en jaune des 250 relevés effectués lors de la mission 1 sur fond d'image SPOT 5 de juin 2005. En vert : le contour des réserves forestières.



Pour chaque point relevé, il était possible de renseigner une trentaine de champs (figure 4). Ces relevés incluait aussi les références des photos terrain correspondantes et, pour les placettes en réserves forestières, la composition floristique, les classes de hauteur et la circonférence.

Parallèlement, cette découverte des formes d'occupation des sols nous a invités à confronter les orthophotos dont nous disposions et ce qui se présentait à nos yeux. Nous avons dès lors établi de premiers critères de reconnaissance comme l'illustrent les tableaux 3 et 4, de manière à anticiper sur le travail de photo-interprétation que nous devons entreprendre dès notre retour de mission. L'échelle 1/5000 des supports d'enquête papier pour les photographies aériennes en couleurs naturelles s'est révélée parfois insuffisante pour observer certains détails utiles. Le 1/2 500 aurait été parfaitement adapté.

Toutefois, ceci aurait imposé de manipuler de très nombreux documents pour chacun des sites étudiés (changement de support papier tous les 500 m si format A4). Pour les images Spot, le 1/25 000 a été suffisant dans la mesure où l'on pouvait parallèlement zoomer à tout moment sur l'écran du GPS.

Tableau 3 : Correspondances entre types de végétation initialement envisagés et aspect sur les photographies aériennes en couleurs naturelles

Poste typologique initial	Photographies aériennes au 1/5000
Forêt humide pseudo-primaire non envahie	Granulation hétérogène (forte variabilité des classes de diamètre et des hauteurs)
Forêt humide pseudo-primaire envahie	Grain uniforme, lissage des hauteurs, couleur vert clair, effondrements parfois visibles (arbres épars maintenus)
Forêt secondaire	Granulation plus homogène, abondance de manguiers
Reboisements	Aspect décliné et canopée plane pour les <i>Terminalia</i> ; piste proche dans tous les cas
Ripisylves	Liserés épais, sombre et généralement continu, en fond de vallée
Padzas nus	Tâches uniformes claires, avec formes d'érosion parfois visibles
Padzas à fougères	Tâches uniformes, vert clair, généralement en bordure de padzas nus
Padzas à graminées	Tâches uniformes grisâtres
Mangrove	Granulosité uniforme, sur larges taches, en bordure de mer
Tanes	Tâches uniformes, brunes, en arrière des mangroves
Agroforêts	Mosaïque liée au parcellaire, plantations d'arbres fruitiers
(Bananeraies)	Plumets groupés, grain très serré, couleur vert clair

Tableau 4 : Correspondances entre espèces ligneuses caractéristiques et aspects sur les photographies aériennes en couleurs naturelles

Manguiers (<i>Mangifera indica</i>)	Taches à peu près circulaires, de grande dimension par rapport aux autres houppiers
Acacia (<i>Acacia mangium</i>)	Petits cercles vert clair, accolés les uns aux autres
Bambous (<i>Dendrocalamus sp.</i>)	Aspect de plumet léger et blanchâtre, s'évasant vers sa périphérie
Cocotiers (<i>Cocos nucifera</i>)	Points découpés, en surplomb, de couleur claire
Badamiers (<i>Terminalia catappa</i>) et autres <i>Terminalia</i> .	Aspect décliné et canopée plane
Bois noir (<i>Albizia lebbek</i>)	Tâches grisâtres, assez peu distinctes
Canneliers (<i>Cinnamomum vera</i>)	Grains très sombre et dense, présent en zones très secondarisées, souvent à proximité de padzas
Baobabs (<i>Adansonia digitata</i>)	Large houppier, aspect grisâtre et plan

Le formulaire d'enquête expérimenté lors de la mission s'est dans l'ensemble révélé bien adapté aux observations à consigner. Il apparaissait néanmoins pertinent d'ajouter deux ou trois présélections supplémentaires dans le menu déroulant en particulier pour les espèces replantées. Le GPS Trimble Géo XM utilisé pour enregistrer la trace a en général donné toute satisfaction à la condition de ne pas le laisser à l'intérieur de l'habitacle du véhicule. Le GPS Trimble Géo XT utilisé pour le géoréférencement des relevés a parfois eu des difficultés à donner un quelconque positionnement lorsque le nombre de satellites en vue était insuffisant. Ce phénomène bien connu a été rencontré à plusieurs reprises dans certains secteurs très encaissés bien que la sensibilité du capteur ait été réglée au maximum (au détriment de la précision).

4.2. – Potentialités et limites des données-image utilisées

Outre l'image du 30 juin 2005 retenue pour l'étude, le choix de l'image d'août 2001 comme second support d'enquête était lié à notre souhait de tester l'intérêt d'une image de saison sèche pour la discrimination de certaines formations, et surtout de disposer d'une image acquise à la même période que celle de la première mission de terrain.

4.2.1. – Compositions colorées retenues pour les images satellites : intérêt du MIR

Nous avons délibérément choisi, pour des raisons d'efficacité et d'encombrement, de n'utiliser qu'un tirage papier par image. Du fait que nous disposions en outre de tirages des photographies aériennes 2008 à la même échelle en fausses-couleurs standard (PIR –R-V en RVB), nous avons opté pour des compositions colorées PIR-MIR-R en RVB. Ceci nous a permis de mieux apprécier l'apport du MIR, tout en ne négligeant pas totalement celui du PIR. Seul le rayonnement Vert n'était pas pris en considération, mais nous disposions de tirages papier en couleurs naturelles au

1/5000 des photographies aériennes. Il n'y avait de toute façon aucun enregistrement du rayonnement bleu réfléchi sur les images SPOT, ce qui interdisait toute composition colorée en couleurs naturelles.

Les différentes observations effectuées permirent dès cette première mission d'affirmer que l'apport du MIR serait fondamental pour la suite de l'étude.

4.2.2. – Ancienneté de l'image 2005

Ce point apparaissait comme l'une des principales limitations, du fait des changements importants parfois intervenus depuis 2005. Il s'avérait par exemple impossible de repérer sur les images des replantations postérieures à 2003. Il nous apparaissait donc déjà que ceci se révélerait comme un inconvénient majeur lors de la *mise en concordance avec les unités issues de la photo-interprétation* des photographies aériennes acquises 3 ans ½ plus tard.

4.2.3. – Résolution spatiale des images SPOT 4 et SPOT 5

Outre l'image du 30 juin 2005 retenue pour l'étude, le choix de l'image d'août 2001 comme second support d'enquête était lié à notre souhait de tester l'intérêt d'une image de saison sèche pour la discrimination de certaines formations, et surtout de disposer d'une image acquise à la même période que celle de la première mission de terrain.

Cette mission a montré l'important fossé existant entre ce que l'on enregistre et détecte avec des pixels de 10 m et avec des pixels de 20 m. L'intégration de l'information qui en résulte débouche parfois sur la création d'objets intermédiaires qui ne correspondent plus à ceux de la nomenclature retenue pour la classification de l'image à 10m. Cette constatation était appelée à rejaillir en permanence lors de la phase 2 où la dynamique devait être appréciée en comparant des enregistrements Spot 4 (20 m) et Spot 5 (10 m).

4.2.4. – Orthophotos

Afin de mieux interpréter le comportement de certains arbres sur la zone sud, nous avons souhaité obtenir des précisions sur la période de prise de vue des orthophotos. Elles ont été réalisées essentiellement en début de matinée et se sont étendues sur une dizaine de jours pendant la première quinzaine de novembre. Il est à noter que sur certains secteurs, les photos ont été prises lorsque le soleil était proche du zénith (cf. figure 4), ce qui confère à certains objets un aspect très particulier (cocoteraies vers Combani par exemple).



Figure 4 : Extrait de la mosaïque des orthophotos 2008 et exemple en partie droite de variation inter-dalles de l'angle de prise de vue

4.2.5. – Effets d’ombrage

Des effets d’ombrage apparaissent de manière particulièrement gênante à la fois sur les photos et sur les images. Ils sont très importants sur l’image de travail retenue pour l’étude car son enregistrement a été effectué à la période de l’année où le soleil est le plus bas. De plus, l’heure de prise de vue (environ 10h30 heure locale) n’est pas idéale et le satellite étant héliosynchrone, elle est (à 15mn près) toujours la même quelle que soit la date de l’enregistrement. Les heures de prise de vue des photos aériennes peuvent par contre être très différentes et l’orientation du soleil être ainsi brusquement inversée d’une photo à l’autre, ce qui ajoute encore à la difficulté d’interprétation (voir figure 6).

4.3. – Données complémentaires à intégrer

4.3.1. – MNT et MNE à 1 m

Au cours de cette première mission, nous avons récupéré sur disque dur un exemplaire du MNT (Modèle Numérique de Terrain) et du MNE (Modèle Numérique d’Élévation) à 1m de résolution, fichiers qui n’avaient malheureusement jamais pu être transférés par ftp malgré plusieurs tentatives. Nous avons de ce fait commencé à travailler sur un produit dégradé à 10 m de résolution qui était largement suffisant pour les premiers essais effectués, mais qui se serait révélé rapidement insuffisant pour une cartographie précise. De plus, suite à certaines remarques de Daniel LESUR liées à la présence d’artéfacts sur les estuaires et les retenues collinaires, le MNT a été corrigé par l’IGN (le MNE n’a par contre pas été modifié).

4.3.2. – Intérêt de disposer d’un MNH

Il a été convenu qu’après mosaïquage des différentes dalles du MNT et du MNH, nous procéderions au calcul du MNH (Modèle Numérique de Hauteur). Ceci allait générer un surcroît de travail considérable mais nous permettre d’aboutir dans une démarche de typologie objective. Cette couche d’information s’est rapidement imposée comme constituant une des clés principales d’identification des grands types de formations boisées, mais aussi de mise en évidence des ripisylves, des zones d’effondrement par les lianes, des forêts et des formations basses.

4.3.3. – RAPAM

Le Service Statistiques agricoles de la DAF a mis à notre disposition pour la durée de l’étude la couche RAPAM qui est particulièrement intéressante. Ces levés ont été effectués en 2003-2004. Son utilisation pour stratifier l’image SPOT de 2005 s’avérerait donc tout à fait possible sans y apporter de corrections importantes. Il est à noter cependant que toutes les parcelles cultivées ne figurent pas sur cette couche et que certains secteurs sont incomplets du fait qu’elle a été réalisée à partir de déclarations volontaires des agriculteurs.

4.3.4. – Zones urbaines

La couche 'urbain' disponible paraissait assez ancienne et sa date de création n'était pas précisée. Nous nous sommes donc interrogés sur la possibilité d'existence à Mayotte d'une autre couche plus à jour ou bien d'un éventuel projet de mise à jour de cette couche avant la fin de l'année 2009. Du fait que « *par définition, seules les zones urbanisées ne sont pas incluses dans le champ géographique de l'étude* » le choix de cette couche était un préalable à tout traitement. Le travail de classification devant être réalisé en dehors des zones urbaines, il était souhaitable de pouvoir disposer dès le départ d'un masque 'urbain' à jour afin d'éviter d'effectuer un second masquage par la suite. Il a donc été convenu de prospecter auprès des organismes susceptibles de disposer d'une telle couche d'information (DAF, DDE).

4.4. – Premiers calages méthodologiques en concertation avec le SRF

La mission n°1 a également permis d'aboutir, dans le cadre d'échanges avec le SFR, à des précisions d'ordre méthodologique ou relevant des résultats attendus dans cette étude.

4.4.1. – Grain d'analyse et priorités d'investigation

Le grain d'analyse, précisé par la taille de l'UMC pour chaque poste de la typologie, relève essentiellement de la photo-interprétation des réserves. La taille de l'UMC pour chaque poste typologique est en effet inspirée de l'IFN³, en recourant aux mêmes critères, toutefois appelés à être nuancés si cela devait s'avérer nécessaire. Il a été convenu que tant qu'une unité restait détectable, l'on pourrait descendre jusqu'à l'UMC, dans la mesure où cela serait regrettable de ne pas recueillir cette finesse d'information dès lors qu'elle était accessible. Dans la pratique, en dehors des réserves, il apparaissait cependant difficile de respecter l'UMC.

Les zones d'intérêt prioritaire ont été définies comme les zones forestières, principalement en réserves, mais aussi les zones érodées (délimitées avec une précision pouvant aller jusqu'à 10 m x 10 m). Il est apparu important d'en reconnaître les principaux constituants caractérisant chaque unité (nature, structure). Des différences dans la structure étaient attendues entre ravines et crêtes.

³ Il fut cependant établi que les critères IFN n'apparaissent pas nécessairement applicables à Mayotte, comme par exemple la définition d'une forêt qui correspond à un taux de couvert arboré supérieur à 40 %.

4.4.2. – Distinction des principaux postes typologiques

La forêt primaire est à proprement parler une forêt pseudo-primaire du fait de perturbations déjà anciennes, que l'on peut parfois détecter par la présence d'espèces bénéficiant de perturbations, comme *Nuxia pseudodentata* et *Aphloia theiformis*. Elle est repérable par le moutonnement aisément repérable de sa canopée, imputable à une large distribution des hauteurs des arbres, qui peut être envisagée comme un critère d'intégrité de la forêt primaire. C'est d'ailleurs ce point physionomique qui sera à la base de notre classification ultérieure lorsque nous passerons à un mode de reconnaissance numérique des types forestiers représentés au sein des réserves forestières.

La forêt secondaire, en continuum avec la forêt primaire, apparaissait aisément distinguable dès lors qu'elle abrite des manguiers, qui y sont généralement fréquents et apparaissent sous la forme de grands arbres. Ce point a été réfuté par la suite, les manguiers nous étant au contraire apparus comme une essence forestière mahoraise totalement intégrée aux écosystèmes forestiers de la forêt humide, y compris les plus naturels. Il apparaît déjà particulièrement difficile de faire la différence entre la forêt originelle composée essentiellement d'espèces indigènes, et les formations secondarisées de type manguiers, avocat marron ou cannellier. Cette difficulté majeure sera ultérieurement, et fort heureusement, résolue par l'utilisation du MNH qui débouchera sur une typologie s'appuyant sur la structure de la végétation et non pas sur sa composition.

Les zones d'invasion de lianes semblaient bien ressortir sur certaines combinaisons de canaux ou de néo-canaux. Elles apparaissaient aisément repérables, y compris de loin, sur le terrain, et paraissaient pouvoir représenter un poste typologique. Nous devons nous apercevoir par la suite que les zones enliannées sont très difficilement détectables en dehors des zones d'effondrement, ces dernières ne présentant au contraire aucune difficulté de reconnaissance. La pérennité des zones non envahies se pose à long terme : l'intérêt de cette cartographie pour le gestionnaire est de pouvoir mieux identifier les zones où il y a priorité d'intervention.

Les plantations d'essences exotiques, parfois détectables par des alignements, n'avaient pas vocation à être distinguées essence par essence. La recolonisation naturelle par des espèces indigènes y est fréquente, peut-être en raison d'un contrôle efficace des feux durant la période coloniale. Il est très vite apparu qu'il n'y aurait pas de traitement unique susceptible de distinguer ces unités de végétation. Comme nous le verrons plus loin, nous avons de fait dû procéder à une délimitation indépendante par photo-interprétation.

Systèmes agroforestiers. Ces systèmes semblent de plus en plus ouverts au fil des années, leur composante forestière s'atténuant (à l'exception d'exemples rencontrés dans le Nord), avec principalement l'abandon de la jachère depuis les années 1970-75, pouvant alors donner lieu à des fermetures du milieu. Au regard des objectifs de l'expertise, ils n'appelaient pas de distinctions particulières (y compris les cocoteraies et bananeraies). Il s'agissait néanmoins d'en isoler les ripisylves, de même que les isolats boisés.

La mangrove ne ferait quant à elle l'objet que d'un seul poste, les tannes devant cependant être distingués.

Espèces décidues. A l'origine, la distinction des essences décidues était mentionnée dans les termes de référence du projet, uniquement pour améliorer la cartographie des formations boisées. Celles-ci étant dans 80 ou 90 % des cas à l'intérieur des réserves, cela revenait dès lors à trouver une ligne de démarcation au sein des réserves entre les différents types de formations en fonction de leur proportion en espèces décidues. En dehors de ces secteurs, il a été convenu que cette reconnaissance n'était pas nécessaire, sauf si les essences décidues formaient des groupements homogènes visibles sur les orthophotos et de taille au moins égale à une UMC, les seules essences concernées étant *a priori* les bois noirs et les érythrines. Nous montrerons plus loin que cela s'est révélé tout simplement impossible avec les données dont nous disposions, en particulier celles du MNH qui ne pouvaient pas fournir une estimation correcte de hauteur en raison de l'absence de feuillage. Le problème ne fut donc pas de les distinguer des autres mais de les détecter ce qui n'a été possible que par post-classification visuelle.

4.4.3. – Cas des padzas

Les padzas constituent un pôle d'intérêt majeur du fait de leur rôle dans l'envasement du lagon, mais également par la problématique « espèces invasives » représentée par *Acacia mangium*. Il a été convenu que les plantations d'*A. mangium* seraient représentées aussi loin que l'on pourrait les distinguer, c'est-à-dire généralement jusqu'au stade gaulis, et sous la forme de pseudo-alignements.

4.4.4. – Nature du sol dans les zones érodées

Il est fait référence dans les termes de référence à une typologie des formations végétales qui permette 'd'identifier les zones érodées selon le type de couverture et *la nature du sol*'. La nature du sol au sens strict est une information pratiquement impossible à obtenir par simple photo-interprétation mais il a été précisé qu'il s'agissait essentiellement de distinguer les zones liées à l'activité humaine (ou au péri-urbain) des zones actives d'érosion. Nous avons également noté lors de nos déplacements que de nombreux sols nus ne sont heureusement pas des zones érodées. Il peut s'agir de talus ou de sols nus ou peu couverts, en particulier en zone sèche. L'utilisation du MNH devait par la suite s'avérer comme un outil adéquat pour traiter ce type de milieu. Il en est de même en zone agricole où les sols sont à nu lorsque les parcelles ont été récemment préparées ou que les cultures sont peu couvrantes.

DEUXIEME PARTIE : PRINCIPES D'ELABORATION DE LA TYPOLOGIE PROPOSEE ET RESULTATS OBTENUS

1. – Choix des principes de l'élaboration

1.1. – Evolution de notre approche

Le choix d'une typologie répond nécessairement à un ensemble d'objectifs spécifiques. S'agissant de typologie de peuplements forestiers ou agroforestiers, un gradient s'observe de manière générale depuis des approches très qualitatives, privilégiées des naturalistes, jusqu'à des approches résolument quantitatives, fondées sur des objectifs de gestion de la production ou, depuis quelques années, de services environnementaux, et préférées par les forestiers.

La consultation des seuls éléments de typologie forestière publiés sur Mayotte, au demeurant listés dans les TDR du projet (Pascal, 1997 ; Boulet, 2007), nous a initialement enclins à adopter une approche qualitative, accordant une large part à des facteurs de dégradation (degré d'ouverture) ou de présence d'exotiques. C'est en ce sens que nous avons conduits nos tout premiers relevés et nos premières délimitations de polygones à partir des orthophotos :

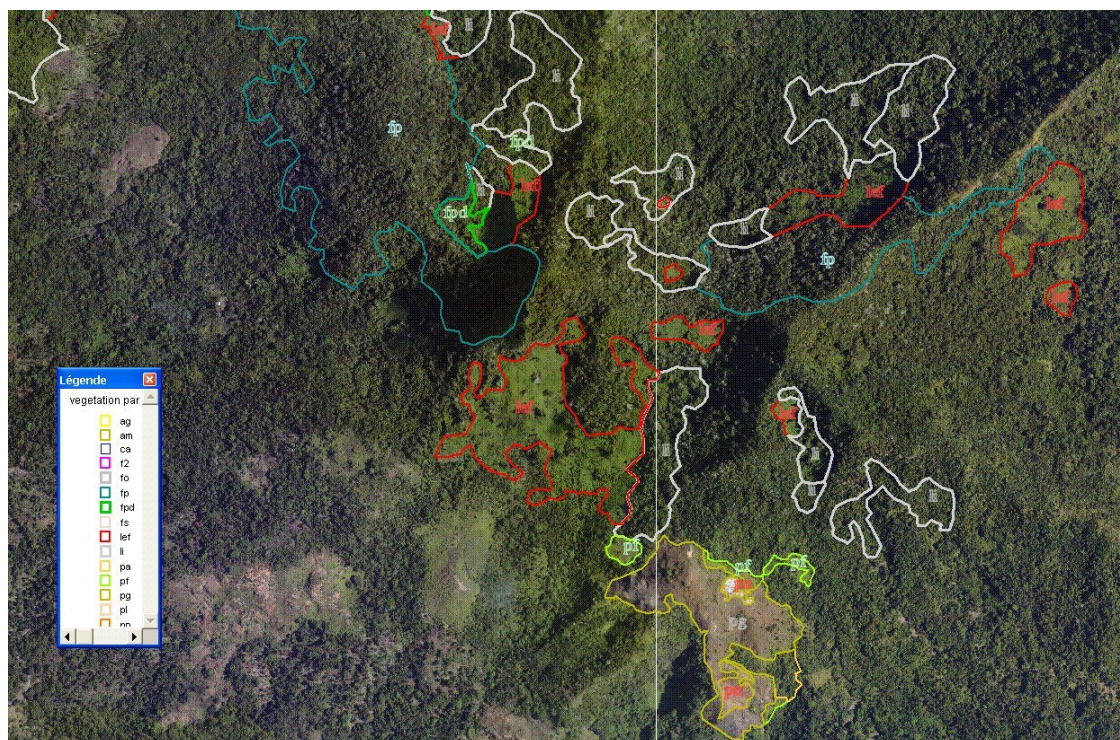
Ag : agroforesterie
Am : Acacia mangium
Ca : carrière
F2 : forêt secondaire
Fp : forêt primaire
Fpd : forêt primaire dégradée
Fs : forêt sèche
Lef : liane effondrée
Li : lianes
Pa : padza arbustif
Pf : padza fougères
Pg : padza graminées
Pl : plantations
Pn : padza nu

Cette première phase de photo-interprétation a été réalisée dans un premier temps essentiellement à partir des orthophotographies IGN issues de la campagne de prises de vue IGN de novembre 2008.

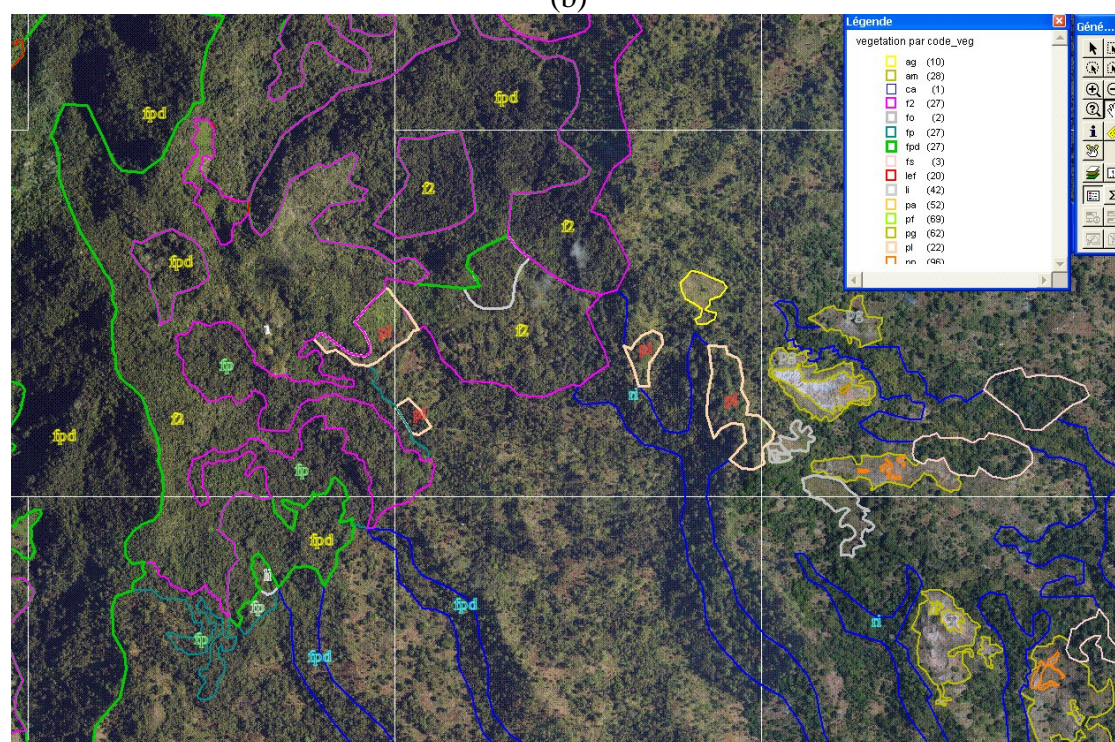
Les travaux ont porté sur l'ensemble des réserves forestières et quelques exemples des résultats obtenus sont montrés figure 1.

Figure 1 : Digitalisation des types forestiers identifiés au sein des réserves : vues partielles sur trois exemples (a : Benara ; b : Majimbini ; c : Hachiroungou, d : Songoro Mbili)

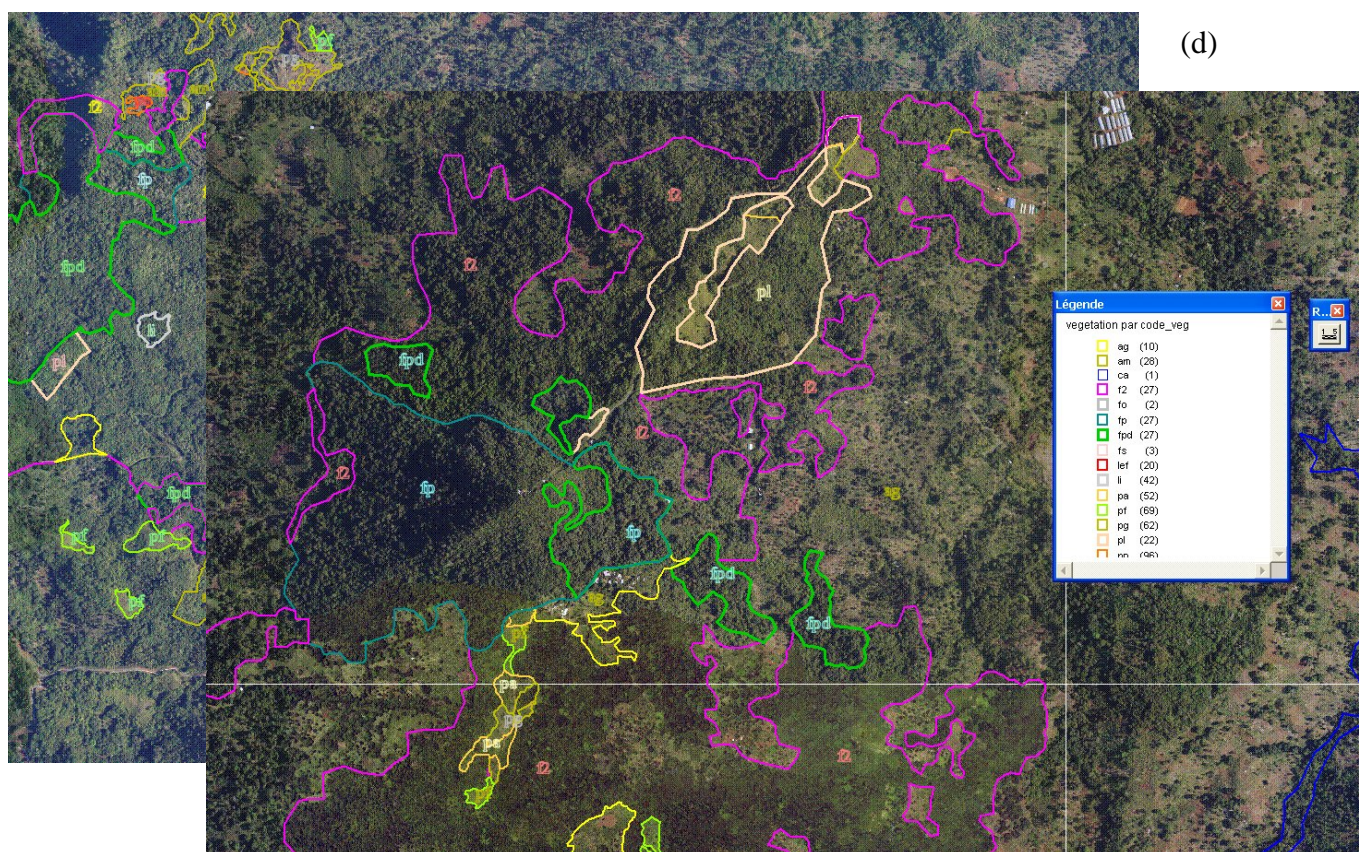
(a)



(b)



(c)



(d)

Par la suite, lors du comité technique du 26 octobre 2009, l'une des principales recommandations du SRF a été *'d'axer les différents postes de la nomenclature sur une échelle de hauteur identifiable avec le MNH, plus proche de la terminologie de la sylviculture classique.'* Les premiers travaux de photo-interprétation des orthophotos basés sur la nomenclature ci-dessus ont donc été complètement repris en novembre 2009 mais en s'appuyant en priorité sur les données du MNH à 1m, combinées à celles des orthophotos 2008 et de l'image SPOT de juin 2005.

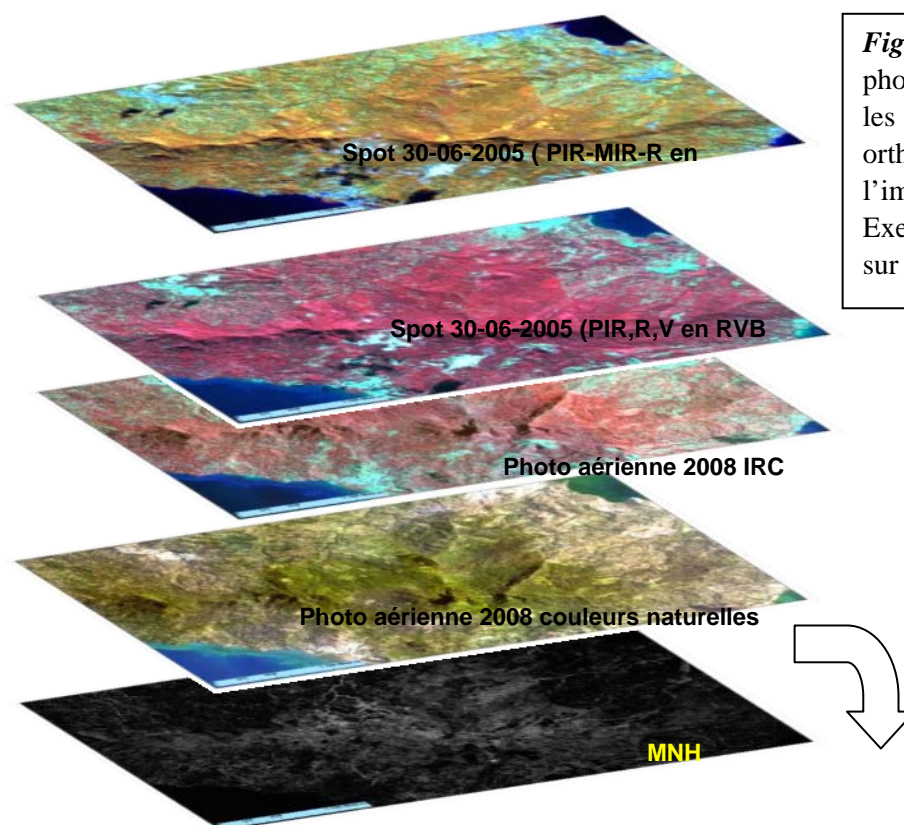
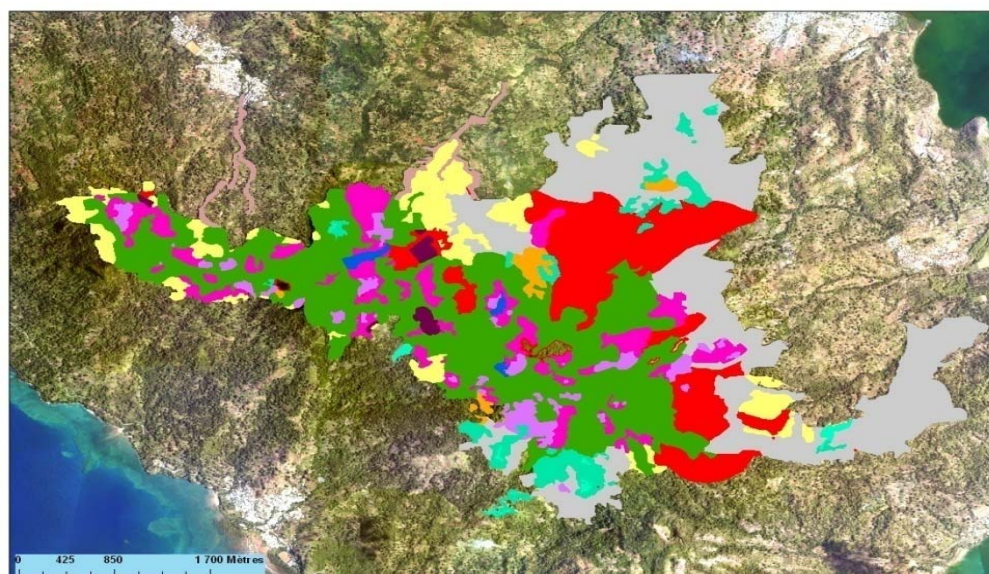


Figure 2 : Seconde étape de photo interprétation utilisant les données du MNH, des orthophotos IGN et de l'image SPOT de juin 2005. Exemple de résultat obtenu sur la Réserve du Bénara.

- Agroforesterie
- Acacia Mangium
- Carrière
- Forêt dense, gros houppiers et homogène
- Fourrés
- Forêt dense, gros houppiers et hétérogène
- Forêt primaire dégradée
- Forêt sèche
- Lianes effondrées
- Lianes sur canopée
- Padzas arbustifs
- Padzas fougères
- Padzas graminées
- Plantations
- Padzas nus
- Ripisylves
- Forêt hétérogène
- Sols nus de crête



Ce travail a été réalisé sur l'ensemble de la Réserve du Bénara et sur une partie de la Réserve de Majimbini mais nous avons constaté qu'il était délicat de formaliser et d'objectiver les critères

retenus pour la photo-interprétation et, en conséquence, d'en assurer la fiabilité et surtout la reproductibilité (tests effectués avec différents photo-interprètes).

De plus, cette approche s'est rapidement révélée à la fois inopérante et décevante. Elle était inopérante dans la mesure où la dégradation procédait à l'évidence d'un continuum (mais quel seuil minimal de dégradation fallait-il alors retenir ?), mais aussi parce qu'il nous apparaissait, lors de nos déplacements sur le terrain, que la forêt mahoraise disposait d'une remarquable résilience mettant en jeu des espèces indigènes (avec le barabai blanc au tout premier plan), mais également des arbres exotiques. En particulier, le manguier nous est rapidement apparu comme une composante à part entière de la forêt mahoraise sous ses formes les plus diversifiées et les mieux structurées. Cette approche qualitative se révélait dès lors décevante parce qu'elle nous paraissait nous renvoyer à des positionnements d'ordre subjectif associant la présence d'exotiques à une perte de valeur, ce qui nous paraissait en contradiction avec ce que nous observions.

1.2. – Intérêt d'une approche quantitative

Ces précédents constats, nos échanges de point de vue avec le responsable du Service des Ressources Forestières, mais aussi la possibilité apparue en cours de projet de recourir au Modèle Numérique de Hauteur, nous ont conduits à percevoir tout l'intérêt d'une approche quantitative. Une telle approche nous paraissait d'autant plus pertinente qu'elle restait fondée sur des données premières de structure de la végétation plutôt que sur des éléments de valeurs, d'ordre subjectif et renvoyant à un référentiel socio-culturel.

En retour, elle présentait néanmoins des éléments non dénués d'intérêt pour quiconque eût préféré développer une approche de type naturaliste, puisqu'elle accordait une part prépondérante à l'analyse de la structure de la végétation, donnée fondamentale de l'écologie forestière. La dimension horizontale de la structure forestière est en effet la résultante des effets de voisinage et de perturbation, et la structure verticale résulte quant à elle de l'architecture des peuplements et de leur dynamique.

1.3. – Exemples d'approches similaires et contraintes respectives

La mise à disposition récente de données radar ouvre de nouveaux champs d'investigation, pour le moment encore relevant du domaine de la recherche. On voit ainsi se développer des études prospectives sur les différentes possibilités d'extraire de façon automatisée, à partir des données LiDAR ou LVIS traduites sous forme de modèles numériques de hauteur, des informations caractéristiques du couvert forestier. A l'échelle du peuplement, cette approche permet ainsi de mettre en évidence le potentiel affirmé des méthodes d'analyse d'images orientées objets dans la délimitation des unités de gestion forestières.

Une telle approche est actuellement développée avec succès par le LaSIG (Laboratoire de Système d'Information Géographique) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, et par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) dans l'objectif de procéder à des inventaires forestiers procédant non plus de relevés de terrain, lourds et coûteux, mais d'une analyse numérique de données radar.

- *LaSIG* – Il s'agit en l'occurrence d'extraire de façon automatisée, à partir de données LiDAR, des informations caractéristiques du couvert forestier exploitables dans le cadre des travaux d'inventaire forestiers. Les critères discriminants pris en compte sont la hauteur maximale, la hauteur moyenne et l'écart-type des hauteurs. Conduite sur deux secteurs de la région de Bevaix, dans le canton de Neuchâtel, cette investigation prospective a permis de distinguer trois type de peuplements : perchis ($4.7 < H_{moy} < 7.8m$, $E_{type} > 5m$), jeune et moyenne futaie ($7.8 < H_{moy} < 12.5m$, $1.4 > E_{type} > 4m$), vieille futaie et peuplement étagé ($12.5 < H_{moy}$, $2.7 < E_{type} < 6.5m$). Une étude en cours porte sur l'analyse du potentiel de l'analyse des histogrammes cumulés de la distribution verticale des points bruts lidar pour la reconnaissance des structures forestières.
- *IRD* – L'analyse fait ici appel à la transformée de Fourier qui permet de classer les images de canopée en fonction des fréquences d'apparition de motifs périodiques de tailles variables. Ainsi, une texture de canopée à grain grossier indique un peuplement dominé par l'alternance de grandes trouées de chablis et de bouquets de gros arbres émergents, alors qu'une texture à grain fin marque la juxtaposition de couronnes d'arbres de petites dimensions.

Un autre type d'approche est développé par le Laboratoire d'Ecologie Terrestre (UPS) au Centre de Télédétection de Toulouse. Il s'agit de mettre au point une procédure de segmentation automatique, l'objectif étant de segmenter la partie supérieure des arbres, en recourant à nouveau à une approche dite variationnelle, basée sur les variations de couleur et de texture. L'objectif ultime de cet ambitieux programme de recherche est de parvenir à une procédure de reconnaissance automatique des espèces visibles en canopée.

1.4. – Choix des deux critères : médiane et écart-type

Le recours au MNH à 1 m permet d'analyser la distribution de la hauteur des points relevés, ce qui renvoie immédiatement aux concepts indépendants de moyenne ou de médiane d'une part, et de variance ou d'écart-type d'autre part. On observera que l'ensemble des recherches conduites actuellement sur l'analyse de données à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) procèdent selon ces deux champs de critères.

Nous avons quant à nous privilégié la médiane à la moyenne dans la mesure où, dans des fenêtres de petite taille qui recouvrent de ce fait un faible nombre d'individus, l'utilisation de la médiane est statistiquement préférable à celle de la moyenne.

1.5. – Choix des seuils associés aux critères retenus

Le calage du seuil de l'écart-type retenu relève de la situation observée. Il dépend de la situation étudiée et est de ce fait appelé à différer d'une grande région à l'autre. Il ne s'impose donc qu'au terme d'un ensemble d'essais visant à obtenir le meilleur compromis possible entre (i) la réalité des situations, observées ou mesurées, (ii) le niveau de segmentation espéré ou toléré, (iii) la clarté et la pertinence de lecture rendues sur le support. Ce point sera présenté ultérieurement dans la partie réservée au traitement numérique des données relevant de la segmentation puis de la classification.

1.5.1. – Seuil de hauteur

La détermination des seuils de hauteurs différenciant les diverses classes relève en partie de ces mêmes contraintes, mais par souci de conformité avec certains référentiels connus, d'autres critères peuvent alors intervenir pour fixer des seuils de hauteur médiane (ou moyenne) permettant de passer d'une classe ou d'un type à l'autre.

- Les *phytosociologues* distinguent classiquement, outre les strates très basses (cryptogamique et muscinale), trois strates de hauteur de végétation : (i) la strate herbacée composée d'herbacées, jusqu'à 1,50 m de hauteur à maturité, (ii) la strate arbustive composée d'arbustes ou buissons (mesurant de 1,5 m à 7 m à l'état adulte), et (iii) la strate arborée composée d'arbres dont la hauteur débute vers les 8 m.
- Les *écologues* particularisent trois types d'arbres selon leur positionnement au niveau de la canopée (partie supérieure de la strate arborée) : (i) les arbres émergents situés au-dessus du niveau moyen de la canopée, la couronne recevant pleinement la lumière, (ii) les arbres co-dominants, généralement situés au niveau de la canopée, la couronne étant entourée en partie au moins par d'autres couronnes et recevant peu de lumière latérale, et (iii) les arbres dominés, généralement situés sous le niveau de la canopée, l'arbre étant plus petit que ses voisins et sa couronne ne recevant pas du tout de lumière latérale.
- Les *forestiers*, enfin, se réfèrent quant à eux à des seuils de hauteurs relatifs à la sylviculture, déterminés en milieux tempérés. Les seuils varient en fonction des pays et des « écoles », mais se situent autour des valeurs suivantes : (i) recrues: 0 à 1,5 m, (ii) fourrés: 1,5 à 5 m, (iii) perchis: 5 à 12/15 m, (iv) futaies: > 15 m. Les valeurs de ces seuils varient selon les régions. Dans le massif vosgien par exemple, ces valeurs diffèrent selon le découpage suivant : semi-fourrés (1-3m), gaulis (3-8m), perchis (8-12m), jeune futaie (12-14m), futaie adulte (14-18m).

Pour des raisons d'ordres normatif (meilleure adéquation possible aux référentiels précédents) et méthodologique (cohérence de rendu), nous avons retenus trois seuils de différenciation de hauteur au sein des zones forestières, correspondant dans notre cas à la médiane des hauteurs dans une fenêtre de 3 m x 3 m : 1,5m, 5 m et 10,5 m. Ces seuils isolent quatre ensembles comme suit :

- La classe <1,5 m relève de la strate herbacée et buissonnante ;
- La classe 1,5-5m regroupe les arbustes ;
- La classe 5-10,5 m regroupe la strate gaulis et une partie de la strate perchis ;
- La classe >10.5 m regroupe quant à elle la partie supérieure de la strate perchis et la strate futaie.

Au sein des réserves forestières, nous pouvons dès lors distinguer quatre grands ensembles de peuplements forestiers naturels selon le positionnement de la hauteur médiane d'une fenêtre d'observation par rapport aux quatre valeurs seuils 1,5 m, 5 m et 10,5 m. Par commodité de langage, le terme de médiane restant peu usité, nous confondrons alors médiane et moyenne pour désigner la médiane.

Nous distinguons donc dans un premier temps, en nous référant à une terminologie purement structurale :

- La végétation de hauteur moyenne inférieure à 1,5 m ;
- La végétation de hauteur moyenne comprise entre 1,5 m et 5 m ;
- La végétation de hauteur moyenne comprise entre 5 et 10,5 m ;
- La végétation de hauteur supérieure à 10,5 m.

1.5.2. – Seuil d'hétérogénéité (ou d'écart-type)

Mais comme indiqué plus haut, notre typologie procède également d'une approche variationnelle, pour laquelle nous n'avons cependant retenu cette fois que deux classes en fonction de la variance de la médiane obtenue dans une fenêtre de 51 m x 51 m. Nous avons donc introduit ici, dès notre procédure de segmentation, un indice d'hétérogénéité de la médiane.

Nous avons préalablement envisagé de retenir les termes de *structure hétérogène* (correspondant à des variances élevées de la médiane) et de *structure homogène* (correspondant à des variances faibles de la médiane). Le premier groupe, qui met en évidence des ouvertures du milieu actuelles ou récentes, recouvre les situations de couvert partiellement ouvert, reflétant des perturbations d'origine anthropique. Le second groupe recouvre les situations de couvert fermé, s'agissant de peuplements généralement matures et bénéficiant d'une certaine intégrité, dans l'acception naturaliste de ce terme.

L'ambiguïté de cette terminologie nous invite néanmoins à adopter des termes plus explicites. Le terme de structure n'est en soi que peu explicite. En outre, l'hétérogénéité d'un peuplement, aux yeux des écologues, renvoie préférentiellement à l'appréciation de la texture de la canopée, ce qui n'est pas le cas dans notre démarche. Au terme de structure hétérogène, nous préférons donc celui d'*hétérogénéité horizontale élevée*, que nous opposons dès lors à celui d'*hétérogénéité horizontale faible*. Ce terme nous paraît en effet nous renvoyer plus explicitement à la nature des données exprimées par le MNH.

2. – Mise en œuvre du traitement numérique

Ce paragraphe mettra l'accent sur les procédures de classification retenues pour la cartographie finale mais de nombreux prétraitements numériques ont dû être mis en œuvre dès réception de données avant même d'entamer les phases de photointerprétation et de terrain. Nous les rappellerons ici en raison du temps consacré à traiter cet important volume de données constitué le plus souvent de très gros fichiers. (la taille du fichier MNH à 1m de résolution est par exemple voisine de 11Go).

2.1. - Prétraitement

2.1.1. – Images satellitaires

Toutes les images SPOT fournies (2001, 2002, 2003, 2005 et 2007) ont été orthorectifiées et l'image de travail du 30 juin 2005 a été rééchantillonnée à 1m afin d'être compatible avec la résolution du MNH.

2.1.2. - Photographies aériennes

Les photographies aériennes ont été livrées sous la forme de 803 dalles au format Géotif (projection RGM04) ayant une résolution de 50 cm. L'acquisition de ces images avait été réalisée par l'IGN en novembre 2008, simultanément avec un capteur classique RVB et avec un capteur proche infrarouge (IRC).

Le premier travail fut de mosaïquer ces données afin de faciliter l'affichage.(une seule image au lieu de 803). Cette opération très longue a été réalisée en plusieurs étapes afin de faire face aux limitations du matériel informatique (création de 4 mosaïques dans un premier temps, regroupées ensuite en une seule image). Elle a été réalisée en parallèle pour les données en couleurs naturelles et pour les données Infra-rouge couleur (IRC).

Elle a permis de confectionner des documents d'enquête terrain à cheval sur plusieurs dalles puis de procéder à la première étape de photo-interprétation réalisée à partir de septembre 2009.

Par la suite, dans un souhait d'homogénéité avec les données du MNH (Modèle Numérique de Hauteur) lors de la phase d'analyse numérique, ces mosaïques ont été dégradées à la résolution spatiale de 1 m.

Enfin, pour des raisons pratiques, nous avons créé une nouvelle mosaïque contenant les 4 bandes : Bleu, Vert, Rouge et Proche Infra-Rouge (PIR).

2.1.3. – Modèle Numérique de Hauteur

Une campagne d'acquisition LIDAR à été effectuée sur tout le territoire de Mayotte pour acquérir un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et un Modèle Numérique de Surface (MNS). Ces deux couches ont une résolution de 1 m.

Ces données ont été livrées au format ASCII sous la forme de 294 dalles pour le MNT et 1558 dalles pour le MNS.

De très lourds travaux de conversion ont permis d'aboutir à une mosaïque de ces données. Ces fichiers ont ensuite été utilisés pour calculer le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) d'une résolution de 1 mètre puis de 5 m à la demande la DAF.

2.2. – Premiers essais de classification numérique

2.2.1. – Essais de classification pixel à pixel et choix de la méthode objet

Les premiers essais ont rapidement montré les limitations des classifications pixel à pixel dans le cadre de la présente étude.

Bien que certains postes d'occupation du sol tels que la mangrove ou les *acacia mangium* soient aisément détectables sur les compositions colorées PIR-MIR-R de l'image de juin 2005 (apport précieux de l'imagerie SPOT), toutes les classifications radiométriques visant à les isoler se sont soldées par un échec en raison de l'importance des confusions radiométriques rencontrées.

La résolution de 10m était en effet notablement insuffisante pour la discrimination de la plupart des objets à isoler, le pixel SPOT contenant souvent un composite ou une association de plusieurs objets inscrits dans l'unité de surface vue instantanément. La valeur enregistrée n'est alors que la résultante de ces différentes composantes et de ce fait ne peut en traduire le caractère dominant.

Les classifications pixel à pixel du MNH à 1m ont à l'inverse abouti à une pixellisation excessive difficilement compatible avec la taille des entités à mettre en évidence dans le cadre de cette étude.

Nous nous sommes donc tournés vers une classification en mode objet qui présentait également l'avantage de pouvoir prendre en compte des paramètres de voisinage ainsi que des données vecteur extraites de certains plans d'information existants (limites des réserves, bâti, contour de l'île etc.).

2.2.2. – Difficultés rencontrées lors des classifications numériques faisant intervenir des images et des orthophotos

La plupart de ces limitations avait été notées lors des phases de terrain et des premiers travaux de photo-interprétation, mais se sont révélées beaucoup plus gênantes, voire rédhibitoires, en abordant le traitement numérique des données.

- Phénomènes de réflectance « quasi-spéculaire » sur certains versants orientés face au soleil lors de l'enregistrement sur les orthophotos ;
- Problème d'égalisation radiométrique entre les dalles de la BD ortho ;
- Années éloignées (2005 – 2008) et périodes d'acquisition différentes (juin – novembre) entre l'image de travail et les orthophotos se traduisant par des changements parfois importants de l'occupation du sol ;
- Difficultés liées aux ombres (faible élévation solaire) et aux nuages.

Dans les deux cas, nous ne pouvions que constater une absence d'information sur l'occupation du sol de ces secteurs de l'image ou de la photo, secteurs plus étendus qu'on pouvait le penser au départ. Une stratification préalable n'étant pas envisageable en raison de l'aspect diffus du phénomène, la création d'une classe ombre, de la même façon que ce qui avait été retenu pour la cartographie précédente effectuée en 2002 (voir figure 2, première partie), était donc inévitable. Toutefois, cette solution n'a pas été jugée recevable par le maître d'œuvre et de ce fait, il ne nous était plus possible d'utiliser ces données comme bases de la classification.

L'ensemble de ces difficultés a montré l'intérêt supplémentaire d'utiliser le MNH comme clé d'entrée.

2.3. - Méthodologie retenue pour la classification

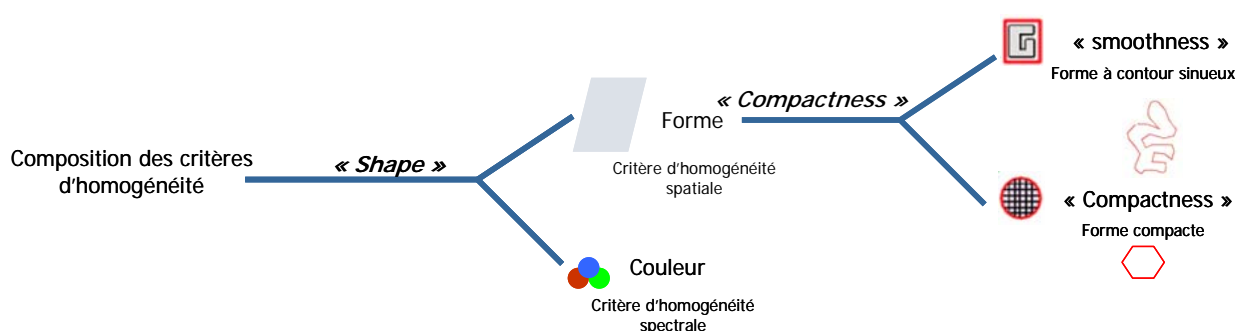
La classification a été effectuée en mode objet à l'aide du logiciel eCognition Developer en nous tournant prioritairement vers un traitement numérique des données du MNH afin de nous appuyer sur des critères 'objectifs' aisément définissables.

2.3.1. – Principes de la classification en mode objet

a) Segmentation de l'image

Il s'agit d'un découpage de l'image en objets homogènes vis-à-vis de critères prédéfinis. Ce travail est effectué en utilisant 3 paramètres :

- Un paramètre d'échelle (scale parameter) : c'est un paramètre qui détermine l'hétérogénéité maximale permise pour un objet. Les objets résultant d'un paramètre d'échelle seront plus petits si la donnée d'entrée est hétérogène ou plus grands si elle est homogène.
- Deux critères d'homogénéité ('shape' et 'compactness').



La valeur du paramètre 'shape' (de 0 à 1) donne le poids que l'on accorde à la forme par rapport à la couleur.

La valeur du paramètre 'compactness' (de 0 à 1) donne le poids que l'on veut accorder à la compacité par rapport à la sinuosité du contour.

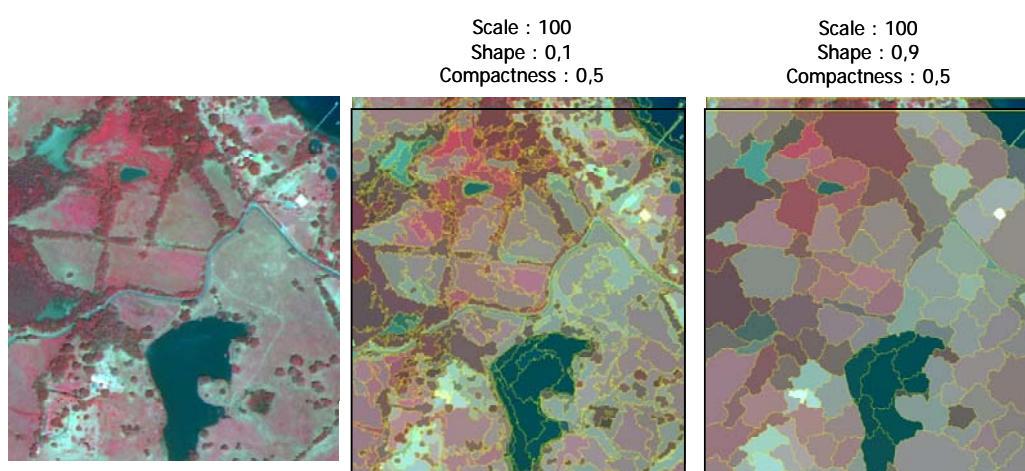


Figure 3 : Illustration de l'influence du poids accordé au critère de couleur par rapport au critère de forme

b) Classification des objets de l'image

C'est l'affectation d'une classe à un objet à partir des attributs spectraux, texturaux de forme et de contexte (à l'échelle de l'objet). Ce processus de segmentation-classification peut ensuite être répété afin de tenir compte de critères complémentaires de ceux retenus pour la première segmentation. C'est ce que nous avons fait en nous appuyant sur l'image SPOT de juin 2005, sur les orthophotos et sur certains plans thématiques exogènes ou issus d'une photointerprétation visuelle des données images à notre disposition. Ce travail s'est cependant heurté, comme nous l'avons déjà signalé, à la présence de nuages mais surtout à celle de l'ombre sur de nombreux versants.

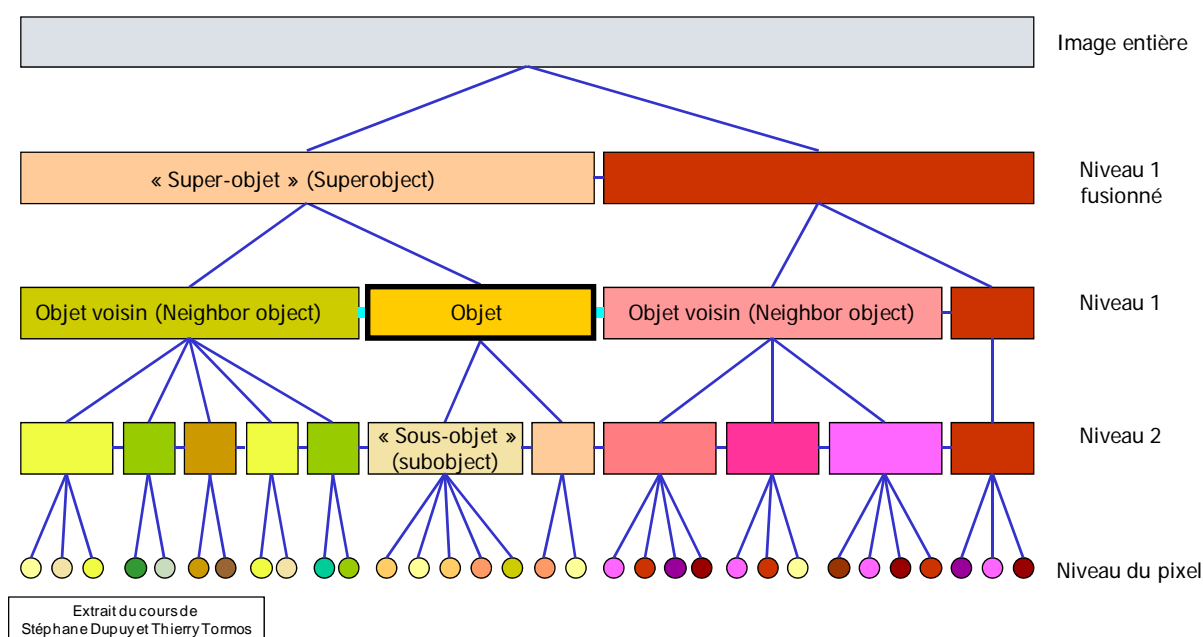


Figure 4 : Hiérarchie entre les niveaux de segmentation

2.3.2. – Premier niveau de segmentation

La première étape dite de segmentation niveau 1 a consisté à générer des objets qui soient les plus proches des entités à mettre en évidence et de la réalité terrain (taille, forme, radiométrie). Cette phase a requis un nombre d'essais assez important mais fut déterminante pour toute la suite de l'étude.

A partir de ce stade, tous les calculs effectués ont concerné des objets (ensembles de pixels) et non plus les pixels eux-mêmes (excepté si un objet avait eu la taille d'un seul pixel).

Nous avons dans un premier temps travaillé à l'intérieur des réserves mais le même type de traitement a été appliqué par la suite à l'extérieur des réserves afin de pouvoir répondre à la proposition du SRF concernant la discrimination des zones d'agroforesterie ouverte (incluant les cultures pures, en association ou sous cocotiers) des zones d'agroforesterie 'fermée' (îlots boisés). Les premiers travaux ont été effectués à partir du MNH brut à 1m.

Les résultats n'ont pas toujours été satisfaisants. Il semble que ceci soit dû au fait que dans certains cas, le signal lidar ne rencontre pas d'obstacle avant d'arriver au sol et renvoie une valeur de hauteur faible ou très faible. Ce qui aurait pu *a priori* être intéressant pour détecter des différences dans la structure des canopées rencontrées (cas des espèces décidues par exemple) se révélait ici davantage proche de l'anomalie voire de l'artéfact. Nous avons donc créé un nouveau canal 'médiane du MNH' calculé à l'intérieur d'une fenêtre glissante 3x3...

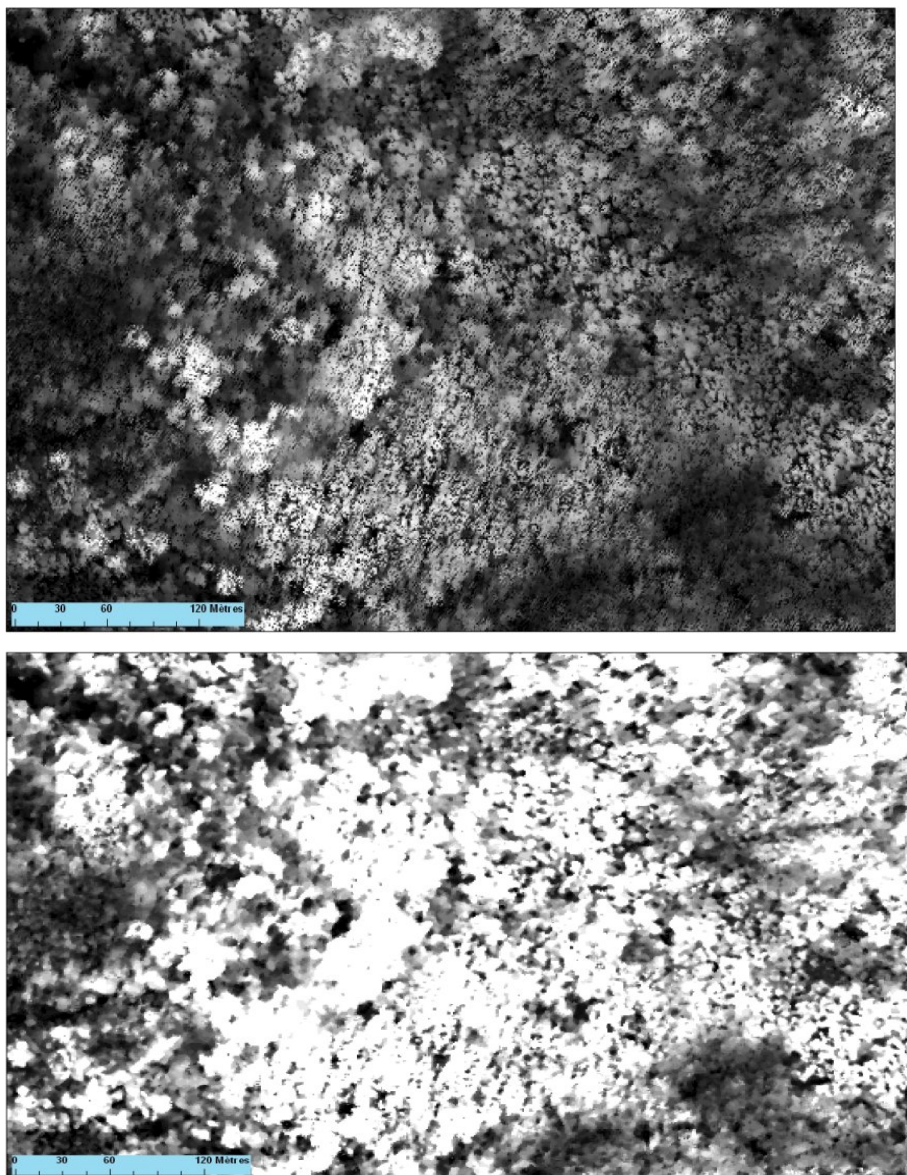


Figure 5 : En haut : MNH au pas de 1m (extrait)
En bas : Médiane du MNH calculée sur une fenêtre 3x3

La seconde difficulté était d'obtenir des objets permettant de définir des classes composées de pixels hétérogènes. C'est le cas par exemple d'une plantation qui est constituée de pixels associés à une hauteur nulle jouxtant selon un motif plus ou moins régulier des pixels associés à une valeur de hauteur élevée. En effet, nous ne voulions pas obtenir des objets individualisant ces différentes valeurs mais au contraire des objets qui, autant que faire se peut, puisse les associer à l'intérieur d'une même entité. L'utilisation de deux filtres dérivés de la médiane (filtre passe-haut et filtre max calculés à l'intérieur d'une fenêtre glissante 3x3) a permis de surmonter cette difficulté.

Ce premier niveau de segmentation a donc été basé sur :

- Médiane du MNH (fenêtre 3x3) ;
- Filtre passe-haut sur la médiane (fenêtre 3x3) ;
- Max de la médiane (fenêtre 3x3).

Les paramètres retenus pour la mise en œuvre de l'algorithme « multiresolution segmentation » d'eCognition sont les suivants :

- Scale parameter : 40 ;
- Shape : 0.3 ;
- Compactness : 0.4.

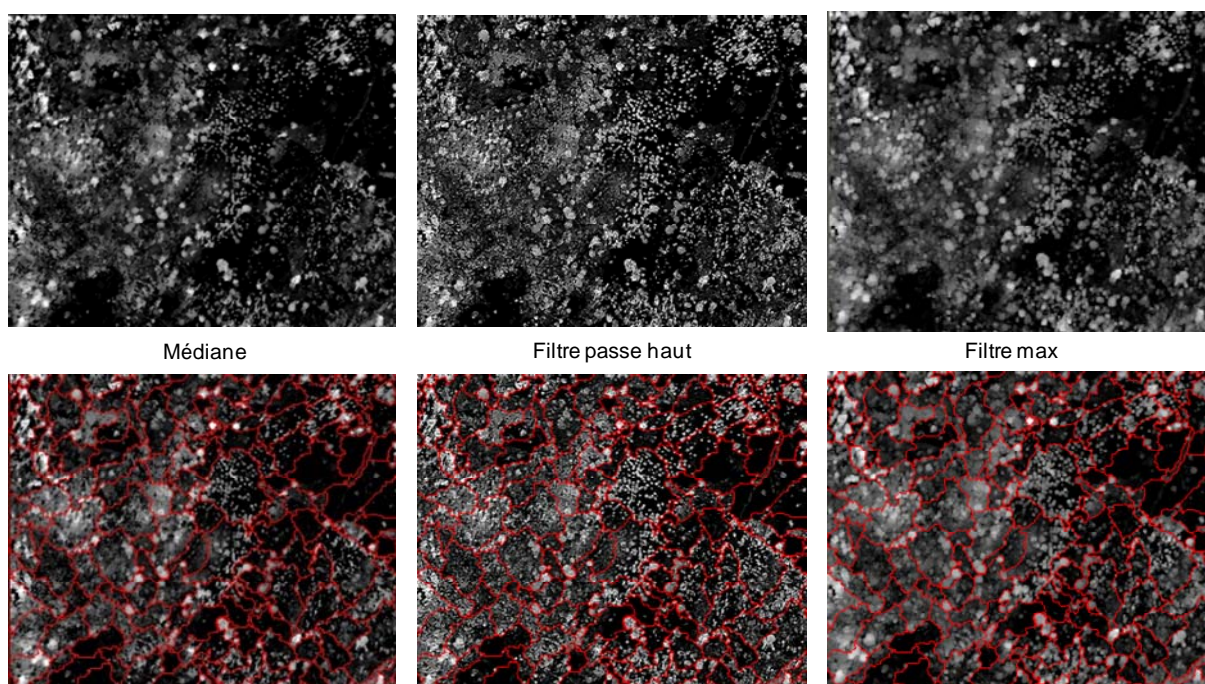


Figure 6 : Superposition aux canaux retenus du résultat du premier niveau de segmentation

2.3.3. – Classification

Cette classification a été basée elle aussi uniquement sur des valeurs liées à la hauteur (médiane et variance de la médiane calculée sur une fenêtre glissante de 51m x 51m). Elle est destinée à obtenir une première séparation des objets issus de la segmentation en fonction de leur hauteur et de la variabilité horizontale de leur hauteur.

Nous avons procédé à la classification de ces objets à partir des seuils 0/1,5m/5m/10,5m puis à partir d'un critère d'hétérogénéité de cette hauteur.

A ce stade nous avons également testé l'apport de nombreux filtres statistiques et texturaux (indices de cooccurrence d'Haralick) associés à différentes tailles de fenêtres.

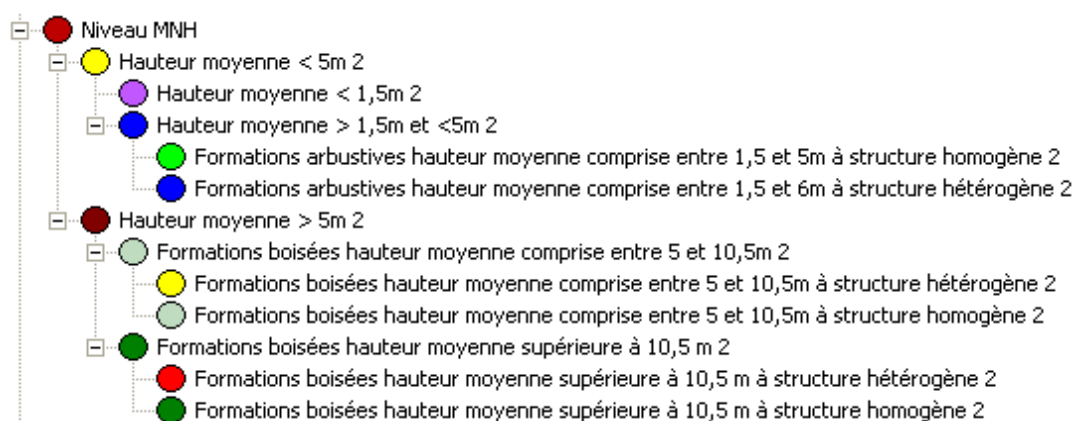


Figure 7 : Hiérarchie des classes du premier niveau de segmentation

En raison de la faible superficie de la plupart des îlots boisés situés à l'extérieur des réserves forestières, la distinction homogène / hétérogène qui nécessite de calculer la variance sur une fenêtre de 51m x 51m n'a finalement été retenue qu'à l'intérieur des réserves ou bien dans les formations boisées situées en périphérie immédiate de celles-ci (voir cartographie finale figure 10 et suivantes).

2.3.4. – Fusion

Cette étape consiste à fusionner tous les objets contigus d'une même classe. Cette étape permet d'obtenir un super niveau de segmentation basé sur la classification. Dans eCognition tous les niveaux de segmentation sont imbriqués les uns dans les autres afin de constituer une hiérarchie d'objets. Ce premier niveau va donc contraindre la création du second niveau de segmentation.

2.3.5. – Création de couches thématiques complémentaires par PIAO

Devant la difficulté à mettre correctement en évidence par classification numérique certains des postes de la nomenclature imposés dans les termes de référence, nous avons dû recourir à la photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO) des images SPOT, des photographies aériennes (2003 et 2008) et MNH pour les isoler. Ces travaux de PIAO ont demandé un temps de travail très important (au total *près de 2000 polygones* ont été dessinés manuellement) ainsi que la mise au point de différents processus de reconnaissance visuelle des objets.

- *Mangroves*

Les entités de mangrove y compris de très petits îlots ont été détectées à partir de l'imagerie SPOT 5 de juin 2005, mais les contours en ont été précisés avec les orthophotographies afin de bien les différencier de certains cordons littoraux ou formations d'arrière-mangrove tels que les marais à *acrostichum aureum* ou les prairies humides.

- *Lianes effondrées*

Ce thème paraissait être un des plus aisés à mettre en évidence mais l'importance des confusions rencontrées lors des essais de classification nous a amenés à combiner visuellement l'apport de SPOT 5 de juin 2005, celui des orthophotos et du MNH (hauteur voisine de 0).

- *Lianes non ou partiellement effondrées*

Ce thème 'voisin' du précédent apparut par contre dès le début de l'étude comme le plus difficile à cartographier même visuellement. La méthode finalement retenue combine l'information issue du canal MNH brut (aspect 'ouaté'), d'une composition colorée de 3 canaux dérivés du MNH : Médiane 3x3, Filtre passe-haut 3x3, variance 33 x33 (qui permet de mettre en évidence la très faible variance des hauteurs), de l'imagerie SPOT avec sa combinaison PIR-MIR-R en RVB et enfin du comportement assez caractéristique (texture, radiométrie) de ces taches enliées sur les orthophotos en couleurs naturelles.

- *Padzas*

Les padzas ne purent être distingués du reste des sols nus ou herbacés que par photo-interprétation combinée du MNH (hauteur nulle) et analyse visuelle comparative des orthophotos 2008 et de 2003 et de l'image SPOT de juin 2005. La carte morphopédologique (Latrille, 1981) fut également fréquemment utilisée pour confirmer leur présence.

- *Peuplements d'acacia mangium*

L'imagerie SPOT de Juin 2005 (PIR-MIR-R) combinée au MNH brut a été particulièrement utile pour détecter visuellement la présence *d'acacia mangium*. Les contours précis des entités concernées nécessitaient par contre d'être dessinés conjointement à l'aide des photographies aériennes et du MNH brut. A noter que de nombreux peuplements étaient impossibles à détecter sur les images SPOT en raison de leur trop faible développement en 2005. Nous avons donc essayé autant que faire se peut, de repérer ces jeunes formations par un balayage complémentaire et systématique de l'image du MNH ainsi que des photographies aériennes.

- *Plantations*

Les plantations en autres essences que les *acacia mangium* ont été cartographiées par analyse visuelle comparative du MNH et des orthophotos 2008 et 2003. Ces unités n'étaient toutefois pas toujours aisément détectables par leur seule structure et les nombreuses relevés effectués lors des missions de terrain ont permis de disposer d'un ensemble de références couvrant de nombreuses situations (Samanea Saman, Takamaka, Mselani, etc.) et précieux pour lever certaines ambiguïtés.

2.3.6. – Compléments apportés aux couches « zones urbaines » et « tannes » fournies par la DAF

La couche 'bâti' fournie par le Service Statistiques Agricoles de la DAF courant mars 2010 nous a permis d'accéder à une information précieuse concernant la localisation du bâti en particulier pour les constructions en dehors des zones urbaines. En effet, les couches 'bâti' disponibles jusqu'alors ont été très utiles pour une première approche mais les contours fournis avaient visiblement été effectués dans le cadre d'une cartographie à une autre échelle et nécessitaient d'être affinés pour être compatibles avec la précision requise dans le cadre du présent projet. Un premier travail a dû en particulier être effectué pour en soustraire les zones de végétation à partir d'un indice calculé sur les orthophotos.

Par ailleurs, de nombreux bâtiments situés en dehors des zones urbaines restaient à isoler. Nous avons alors appris l'existence d'une couche 'bâti' plus précise et plus complète utilisée par le Service Statistiques Agricoles de la DAF dont nous avons pu disposer dans le cadre d'une convention établie pour la durée du projet. Dès la réception du fichier courant mars, nous avons procédé à sa mise à jour en ajoutant quelques constructions apparues depuis la date à laquelle cette couche avait été créée. Nous avons ensuite utilisé cette couche comme masque pour effectuer le travail de classification sur l'ensemble du territoire en dehors des zones bâties. Une classe 'artificialisé' a été également définie.

Il nous a également été proposé par Madame Caroline Cremadès (Service Environnement et Forêt de la DAF) de nous mettre à disposition la couche ‘tannes’ élaborée suite à ses relevés de terrain. Nous avons ajouté à cette couche quelques autres sols nus littoraux repérés visuellement sur les orthophotos (hormis les plages cartographiées séparément) et qu’il y avait lieu, pour notre étude, de distinguer également des sols nus ou herbacés attachés à l’agriculture et à l’agroforesterie.

2.3.7. – Second niveau de segmentation

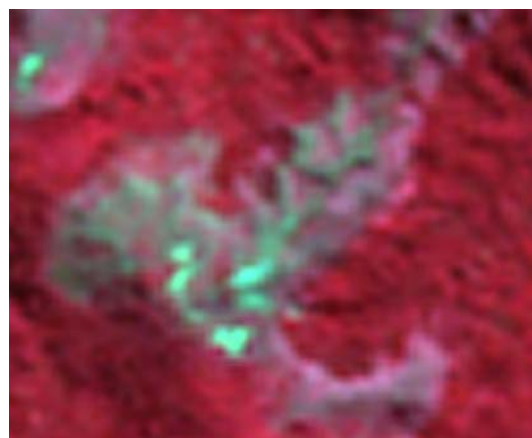
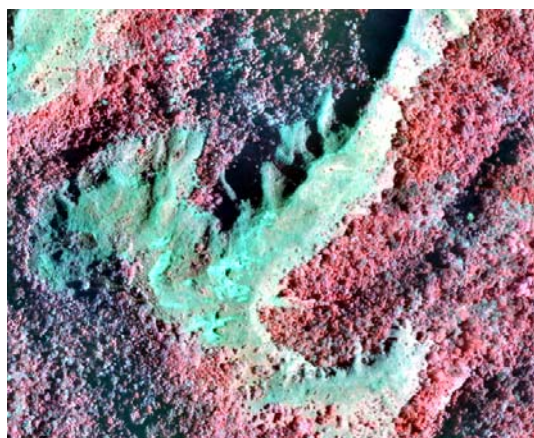
Pour cette nouvelle segmentation (à l’intérieur des objets précédents) nous nous sommes appuyés sur :

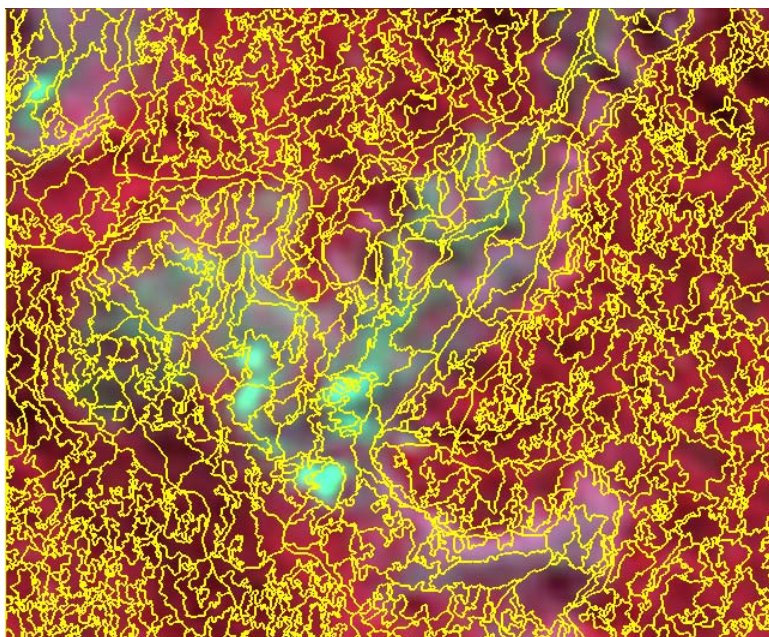
- Les 4 canaux de l’image SPOT (V, R, PIR et MIR) du 30 juin 2005 ;
- Les 4 canaux des orthophotos IGN (B, V, R, PIR) de novembre 2008 ;
- Les plans thématiques (couches vecteurs issues de la PIAO combinée de l’ensemble des données images en notre possession) (cf. 2.3.6.) ;
- Les plans thématiques fournis par le SRF en début de projet : limites des réserves forestières, contours de l’île.

La segmentation devait en effet s’appuyer également sur les polygones constitutifs de ces plans thématiques afin de pouvoir tenir compte de ces contours dans la classification finale.

Ce travail s’est heurté, comme nous l’avons déjà signalé, à la présence de nuages, mais surtout à celle de l’ombre sur de nombreux versants.

Figure 8 : Exemple de subdivision des objets du 1^{er} niveau à partir de SPOT PIR-R-V et de l’orthophoto 2008. Le résultat superposé à l’image SPOT montre bien l’apport de chacune des images (extrait sur la Réserve Forestière de Majimbini).





2.3.8. – Classification

La classification des objets de niveau 2 a été effectuée selon une démarche différente pour chacune des classes en utilisant les canaux ou néo-canaux qui sont apparus comme les plus pertinents. Nous l'illustrerons par deux exemples :

a) Cas des mangroves

Le plan thématique mangrove issu de la phase de PIAO incluait encore quelques segments de sol nu ou d'eau. Dans un premier temps, nous avons isolé l'eau et les sols nus à l'aide du NDVI calculé sur les orthophotos. Les sols nus ainsi discriminés ont été ajoutés à la couche 'tannes et sols nus'. Puis l'eau a été isolée à l'aide du canal MIR de SPOT 5.

Le reste des mangroves a ensuite été classé en quatre catégories de hauteurs (0-3 ; 3-6 ; 6-10; >10m) à partir de la médiane du MNH. Les seuils retenus sont un peu différents de ceux utilisés pour les massifs forestiers de l'intérieur de façon à mettre en évidence des entités homogènes en particulier pour les formes arbustives ouvertes des mangroves externes et internes. De plus, outre la mangrove arbustive (moyenne des hauteurs entre 3 et 6m), deux classes de mangroves arborescentes ont pu être distinguées.

b) Cas des padzas

Il nous appartenait de distinguer 4 types de padzas selon la couverture du sol : sol nu, herbacées, fougères, arbustes. A partir du plan thématique obtenu par PIAO, nous avons procédé comme suit :

- Croisement du plan 'padza' avec la classe 'arbustes' pour isoler les padzas arbustifs (fréquemment en bordure) ;
- Croisement du plan 'padza' avec la classe 'végétation basse < 1,5 m' pour discriminer les padzas des autres sols nus couverts de végétation basse ;
- A l'intérieur de la classe 'padza < 1.5 m' ainsi obtenue, seuillage du NDVI des orthophotos pour isoler les fougères ;
- Création d'une classe padza nu et d'une classe padza herbacé par NDVI de SPOT 5.

L'ensemble des démarches utilisées pour chacune des classes est récapitulé dans le diagramme hiérarchique de la figure 9. Toutefois les canaux et néo-canaux utilisés n'y sont pas mentionnés.

2.3.9. – Post-classification numérique

En dehors des réserves, la classification a mis en évidence de très nombreux objets (issus de la segmentation) ne correspondant pas toujours à une réalité.

a) La classe 'arbustifs' a été dans un premier temps fondue dans la classe 'sols nus et formations basses (inf à 1,5m)' correspondant aux espaces agricoles de faible hauteur (cultures, prairies même humides). Mais nous perdions ainsi trop d'informations intéressantes.

Nous avons donc décidé de la conserver mais en supprimant les unités de taille inférieures à 7500 m². Cela nous permettait de ne pas éliminer certaines cultures (inf à 5m à couvert fermé) de même que et la plupart des formations arbustives du littoral (hibiscus..) qu'il était délicat de mélanger avec l'agroforesterie. Le même problème se posait pour les fourrés et arbrisseaux de forêt sèche qui sont désormais inclus dans cette classe 'peuplement arbustif ou arboré très clair'

b) Toutes les unités arborées de taille inférieure à 1500m² ont été fondues dans la classe dominante du voisinage immédiat. Ainsi, en zone agroforestière, les arbres ou bouquets d'arbres isolés de taille inférieure à 1500 m² ont disparu.

Toutefois, afin de ne pas trop interrompre les ripisylves, ce travail n'a pas été effectué à l'intérieur des ripisylves les plus importantes.

2.3.10. - Post-classification manuelle

Cette ultime phase fut indispensable essentiellement en raison des quelques confusions avec l'eau induites par les ombres des nuages. Il était par ailleurs nécessaire de corriger quelques artéfacts ou erreurs liées aux classifications, réparer certains oublis intervenus lors des phases de PIAO. Enfin, nous avons préféré compléter manuellement certains tracés de rivière parfois interrompus en zone littorale en raison du découpage en segments.

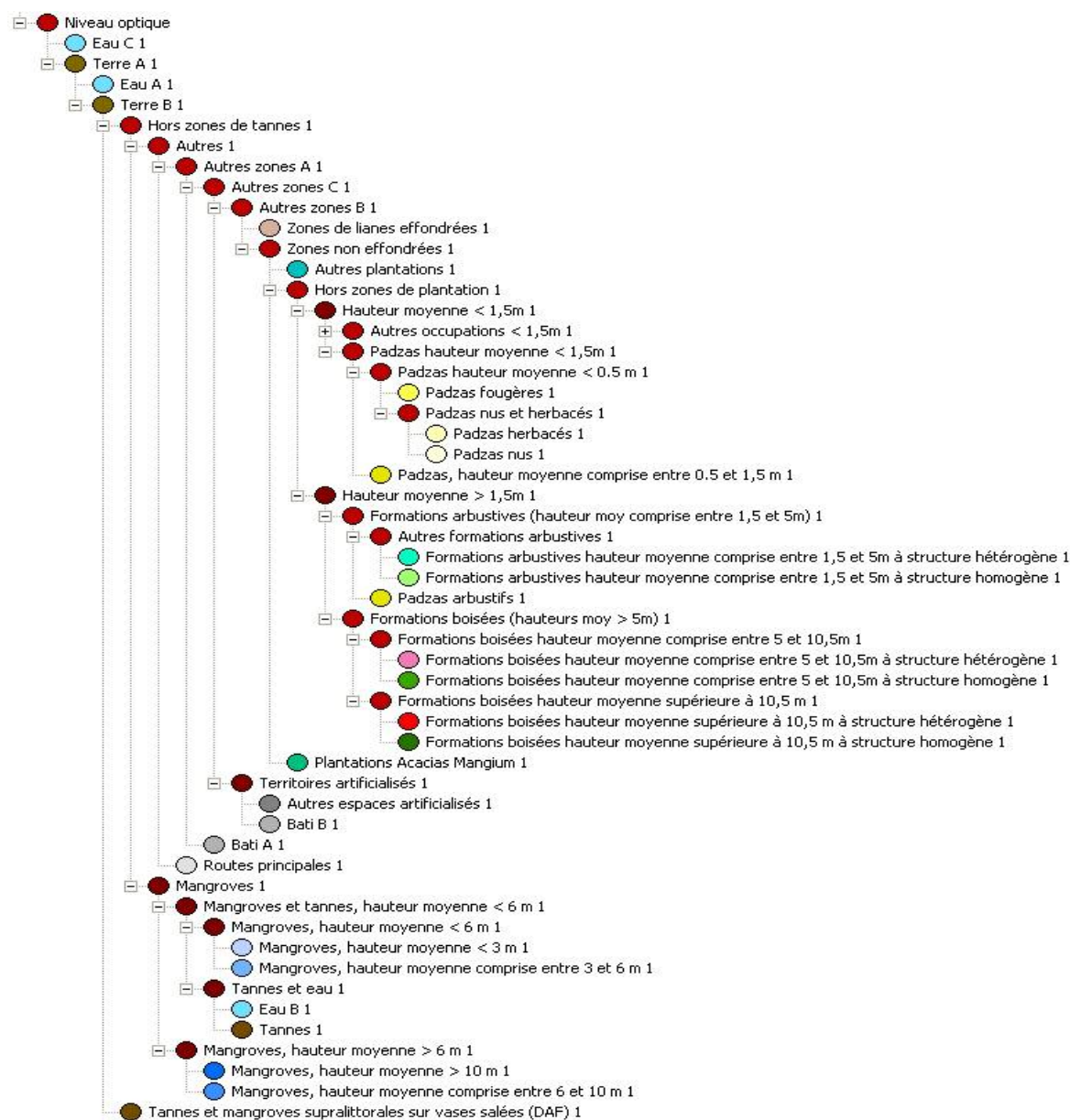


Figure 9 : Hiérarchie des classes du second niveau de segmentation

2.3.11. – Définition des postes de la typologie

Plage, falaise ou rochers littoraux	Plage de sable minéral ou corallien ou rochers littoraux découverts. Falaise.
Mangrove (hauteur moyenne inférieure ou égale à 3m)	Mangrove externe très basse, basse ou arbustive ouverte à <i>Sonneriata alba</i>
Mangrove (hauteur moyenne comprise entre 3 et 6 m)	Mangrove arbustive externe à <i>Sonneriata alba</i> ou centrale à <i>Ceriops tagal</i>
Mangrove (hauteur moyenne comprise entre 6 et 10m)	Mangrove centrale arborescente à <i>Bruguiera gymnorhiza</i> et <i>Rhizophora mucronata</i>
Mangrove (hauteur moyenne supérieure à 10m)	Mangrove centrale arborescente très dense.
Tanne et mangrove supralittorale	Tanne et mangrove supralittorale à <i>Avicennia marina</i>
Sol nu sur padza	Terrain nu sans végétation, à facies de type ' <i>bad lands</i> ', soumis à une érosion active, pour lequel des processus naturels de colonisation n'ont pu se mettre en place, et pouvant dès lors donner lieu à des processus d'emballement participant çà l'envasement du lagon.
Prairie sur padza	Formation à graminées (généralement <i>Aristida sp.</i> ou parfois <i>Imperata cylindrica</i>), souvent parcourue par les feux, et pouvant dès lors donner lieu à une activation de l'érosion, jusqu'à dénudation des surfaces ; en cas de contrôle des feux, une colonisation par la végétation indigène peut se mettre en place en cas de proximité de reliques forestières.
Fougeraie sur padza	Formation à <i>Dicranopteris linearis</i> , qui affecte les sols lessivés et colonise certains padzas depuis les bords, les rendant cependant impropres à la colonisation par la végétation ligneuse (blocage des semences par une litière très épaisse, allélopathie), et donnant donc lieu à un blocage des successions secondaire de végétation.
Buisson sur padza (hauteur moyenne inférieure ou égale à 1,5 m)	Formation clairsemée liée au maintien ou à la colonisation d'espèces ligneuses indigènes, le plus souvent à la faveur de dispositifs de propagation végétative ; faible hauteur moyenne en raison du maintien d'espaces dénudés ou occupés par une formation graminéenne.
Peuplement homogène en acacia mangium	Formation découlant en très grande partie d'une plantation initiale en <i>Acacia mangium</i> à vocation de protection, qui peut s'étendre localement ou se densifier par régénération naturelle, la germination étant favorisée par les feux et la production d'une litière rendant le terrain impropre au pâturage.
Plantation en autres essences	Formation arborée résultant de plantations sylvicoles à vocation de production, essentiellement représentée par des espèces

	héliophiles (<i>Adenanthera pavonina</i> , <i>Calophyllum inophyllum</i> , <i>Samanea saman</i> , <i>Swietenia macrophylla</i> , <i>Terminalia catappa</i> , <i>T. superba</i>).
Végétation basse (hauteur inférieure à 1,5m) ou arbustive claire (hors réserve forestière)	Formations diverses de taille moyenne inférieure à 1,5m (végétation de haut d'estran, prairies humides, marais à <i>acrostichum aureum</i> , pâturages, cultures basses, friches herbeuses et rudérales, buissons...) auxquelles il faut associer l'ensemble des formations arbustives claires, agricoles ou non, telles que les vergers à couvert discontinu.
Végétation basse (hauteur inférieure à 1,5m) en réserve forestière.	Formation végétale basse (prairie, fougère, friche) présente en dehors des padzas dans les réserves forestières.
Peuplement arbustif ou arboré très clair	Formation de hauteur moyenne comprise entre 1,5m et 5m (cordon littoral et taillis supralittoral à <i>hibiscus tiliaceus</i> et <i>thespesia populnea</i> , fourré sec, formation arbustive intérieure, culture couvrante, formation arborée discontinue et peu couvrante (cocoteraie) ou peuplement d'espèces arborées caducifoliées (<i>albizia lebeck</i>). La surface minimale de représentation est de 0,75 ha.
Espace boisé (hauteur moyenne comprise entre 5 et 10 m)	Formation forestière recouvrant une diversité de situations : jeunes peuplements forestiers en réserve forestière, ou peuplements agroforestiers à couvert fermé ; le degré de fragmentation, qui reste minimum au sein des réserves, peut être très élevé dans les paysages ruraux. Ripisylve ou cordon littoral arboré. Surface minimale de représentation : 0,15 ha
Espace boisé (hauteur supérieure à 10 m)	Même commentaires que précédemment, mais en présence de facies plus matures, ou d'espèces de grande taille s'il s'agit d'agroforesterie à couvert fermé. Ripisylve. Comprend également la forêt supralittorale d'arrière-mangrove à <i>Heritiera littoralis</i> et adlittorale à <i>Erythrina fusca</i> . Surface minimale de représentation : 0,15 ha
Peuplement de réserve forestière ou contigu (hauteur moyenne comprise entre 5 et 10 m) à hétérogénéité horizontale élevée	Formation forestière intégrée ou attenante aux réserves forestières, généralement peu fragmenté mais à couvert discontinu, souvent présent en bordure des réserves, sur les zones de faible pente ayant autorisé dans le passé une mise en valeur agricole, à laquelle a succédé la mise en place d'un facies forestier indigène très proche de la végétation originelle, à la faveur d'une résilience notoire de la forêt indigène mahoraise. Surface minimale de représentation : 0,15 ha
Peuplement de réserve forestière ou contigu	Même commentaires que précédemment, mais en présence de facies plus matures, ou parfois d'espèces exotiques de grande

(hauteur supérieure à 10 m) à hétérogénéité horizontale élevée	taille (ex : <i>Mangifera indica</i> , <i>Pterocarpus indicus</i>). Surface minimale de représentation : 0,15 ha
Tache de peuplement enliané ou partiellement effondré	Zone incluse dans un peuplement forestier exposé à l'enliement par des espèces indigènes (<i>Merremia peltata</i> , <i>Saba comorensis</i> , <i>Entada rhedii</i>), de délimitation confuse s'agissant le plus souvent d'un gradient d'enliement localement exacerbé à la faveur de facteurs prédisposants (ex : pente, perturbations anciennes).
Tache de peuplement enliané effondré	Zone incluse dans un peuplement forestier exposé à l'enliement par des espèces indigènes (<i>Merremia peltata</i> , <i>Saba comorensis</i> , <i>Entada rhedii</i>), où se sont manifestés des effondrements, vraisemblablement déclenchés par des vents violents entraînant des chablis en château de cartes.
Espace bâti	Bâtiments à vocation commerciale, industrielle ou d'habitation. Cette couche a été créée par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt suite à une importante campagne de localisation par GPS des bâtiments sur l'ensemble du territoire. Chaque bâtiment a ensuite été dessiné manuellement.
Autre espace urbain ou artificialisé	Zone urbaine non bâtie : rue, parking, zone portuaire et aéroportuaire, jardin, espace sportif et de loisir (golf, terrain de football...), espace vert urbain
Carrière, chantier ou décharge	Zone d'extraction de matériaux ou chantier, décharge
Route principale	Grand axe routier

3. – Produits livres

3.1. – Données orthorectifiées et mosaïquées

- Mosaïques du MNT et du MNS au pas de 1m (format tif) ;
- Mosaïques des orthophotos 2003 à 50cm (format ecw) et 2008 à 1m (img et ecw) ;
- Images SPOT des 22/06/87, 09/09/95, 22/07/2001, 17/08/2001, 10/06/2002, 15/10/2003, 30/06/2005, 16/10/2007, 07/10/2009 orthorectifiées (9 fichiers tif).

3.2. – Produits dérivés

- MNH au pas de 1m (format tif) et MNT, MNS et MNH au pas de 5m (en ASCII) ;
 - Fichier orthophotos à 4 canaux (B-V-R-PIR) (img) ;
 - Indices dérivés du MNH : Médiane 3 x3 (tif) ;
 - Indices dérivés de la médiane 3x3 : max et filtre passe-haut (fenêtres 3x3) variance 51x51 (tif)
- Composition colorée utilisée pour la détection des lianes :
- R : médiane, V : passe-haut, B : variance 33 (ecw).

3.3. – Produits cartographiques numériques

La cartographie définitive obtenue à l'issue des différentes étapes détaillées au paragraphe 2 ci-dessus a été réalisée courant avril 2010.

Le produit cartographique principal est une typologie des espaces à dominante boisée de Mayotte en 26 classes.

A l'intérieur des réserves forestières ou dans leur périphérie immédiate, il a été procédé à la distinction des secteurs enlianes, ainsi que des formations présentant une forte hétérogénéité horizontale de hauteur de la canopée.

La classification est fournie en mode vecteur aux formats 'shape' et map-info ainsi qu'en mode raster aux formats img et tif (pour 25 des 26 classes).

Le cas des taches de lianes non ou partiellement effondrées (appelées parfois 'lianes sur canopée') est en effet un peu particulier : nous avons préféré ne pas les inclure comme classe raster en tant que telle dans la classification ci-dessus afin de ne pas masquer le type de formation boisée sur laquelle cette tache de liane avait été détectée. Nous aurions en effet perdu une information intéressante concernant la hauteur et la structure horizontale de la formation sous-jacente.

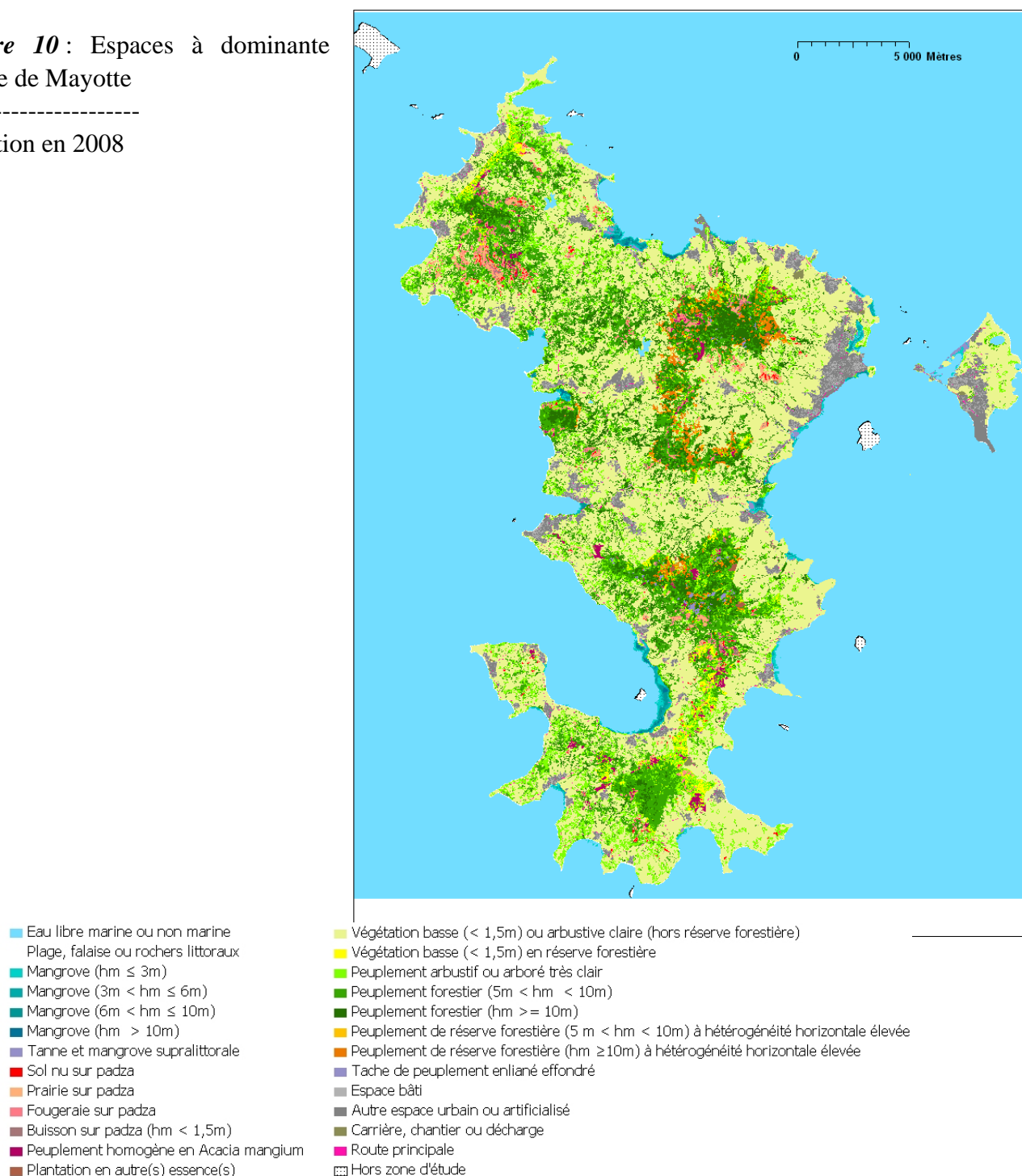
Cette typologie des espaces à dominante boisée est constituée d'un fichier vecteur de quelque 100 000 polygones.

3.4. – Produits cartographiques papier

A ces produits numériques, il faut ajouter la confection d'une carte papier au 1/50 000e (format A0) de la typologie des espaces à dominante boisée (livraison en juin 2010).

Figure 10 : Espaces à dominante boisée de Mayotte

Situation en 2008



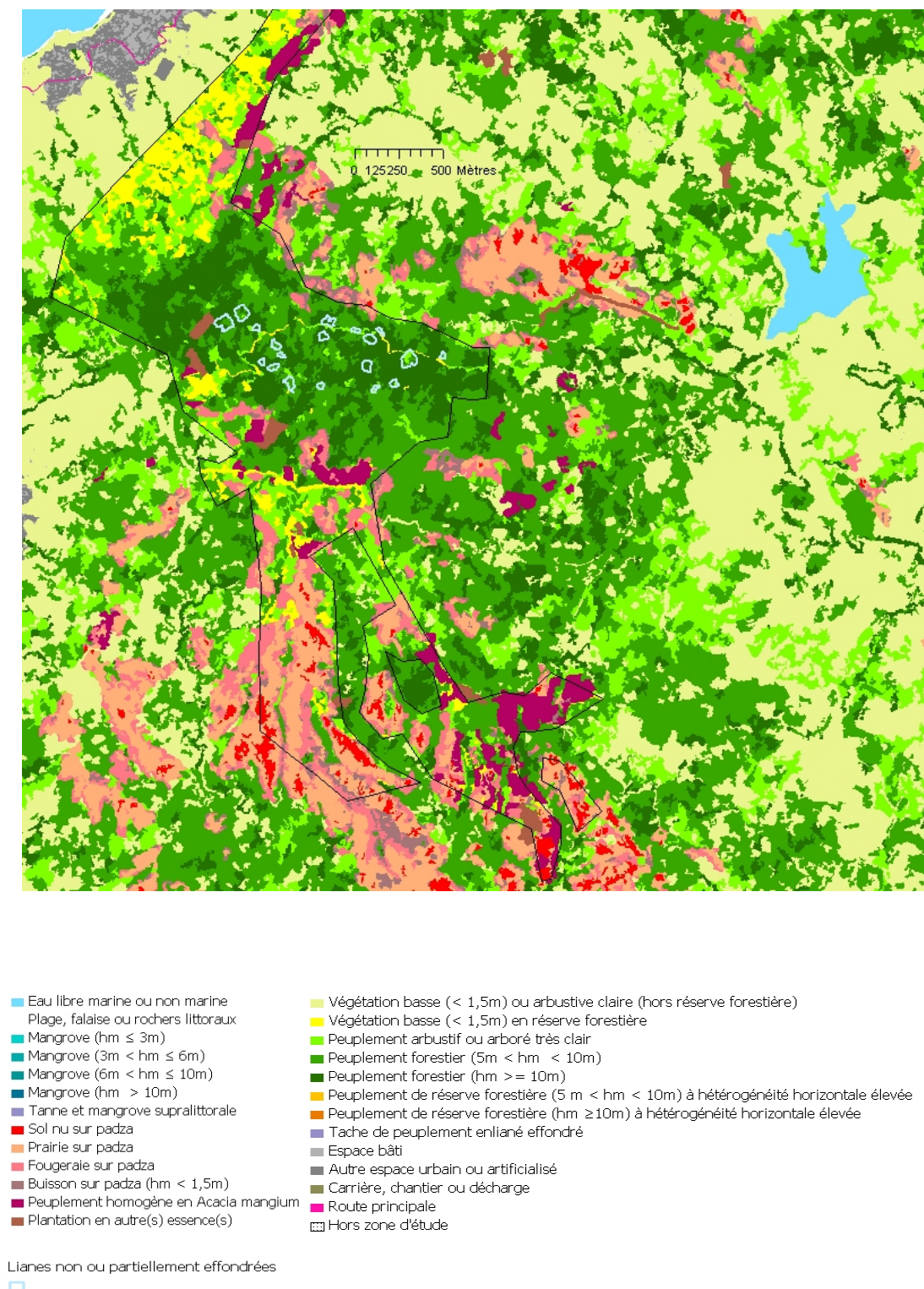


Figure 11 : Espaces à dominante boisée de Mayotte – Situation en 2008
: Réserve Forestière des Crêtes du Nord (extrait)

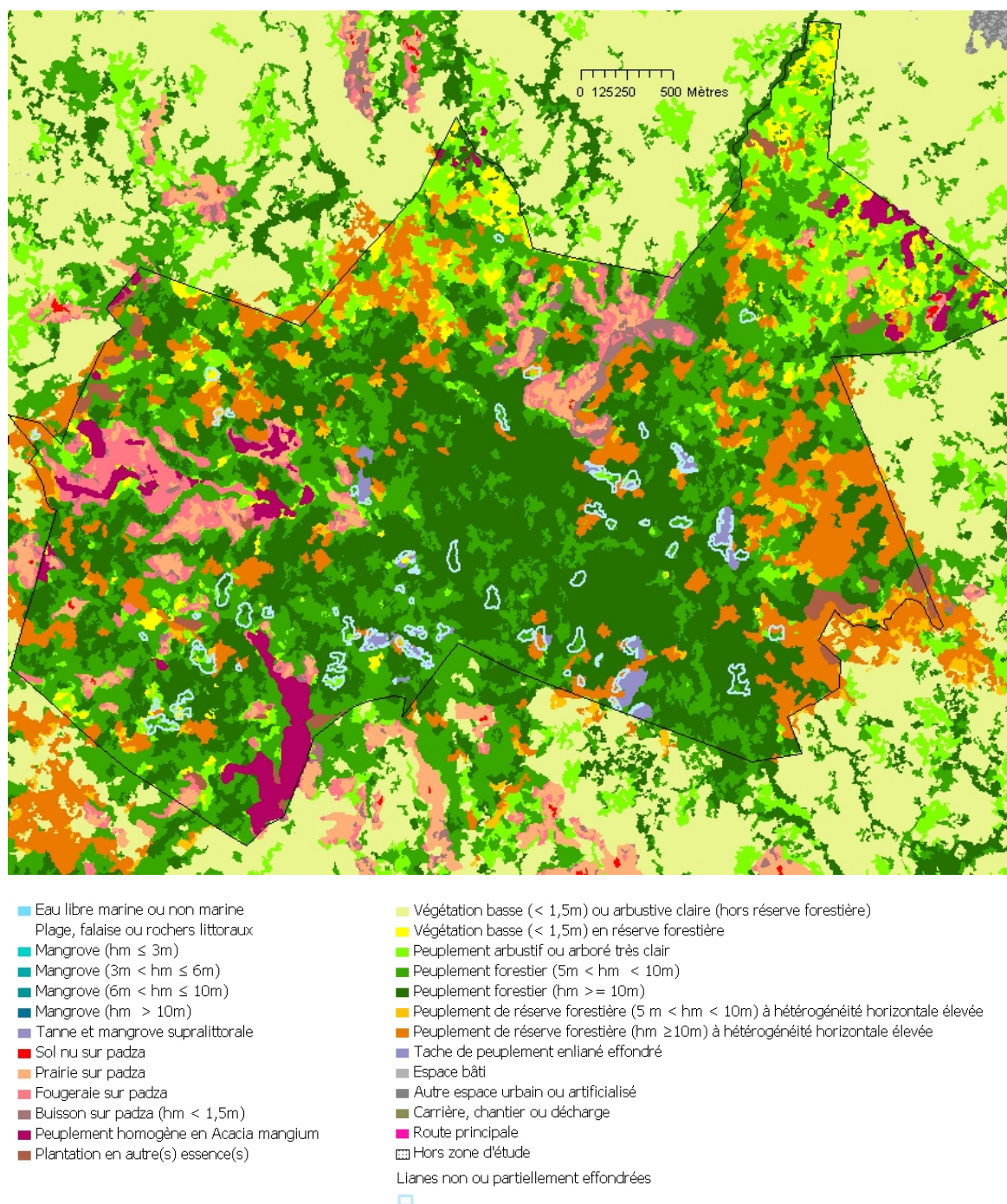


Figure 12 : Espaces à dominante boisée de Mayotte – Situation en 2008 :
Réserve Forestière de Majimbini

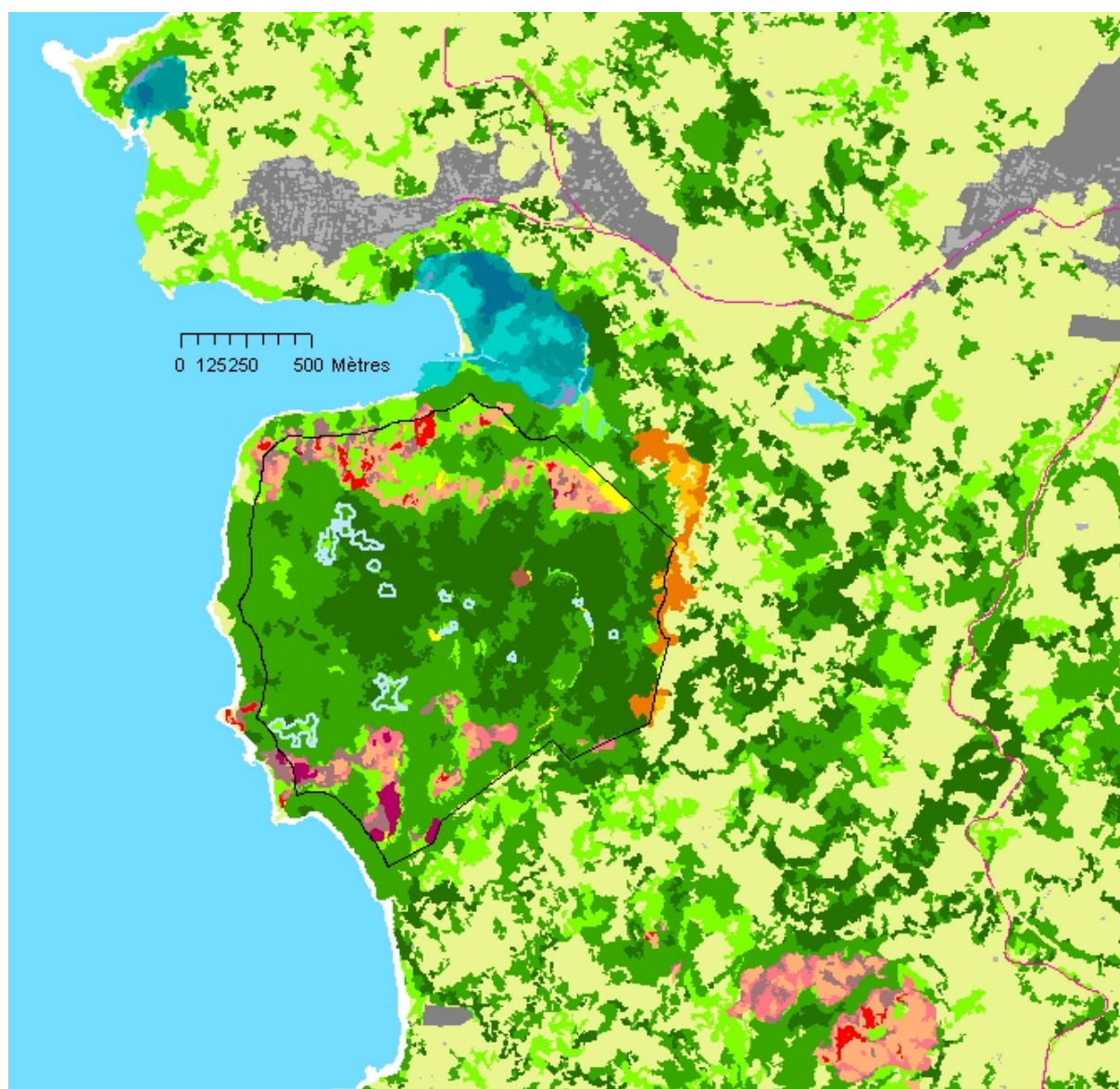
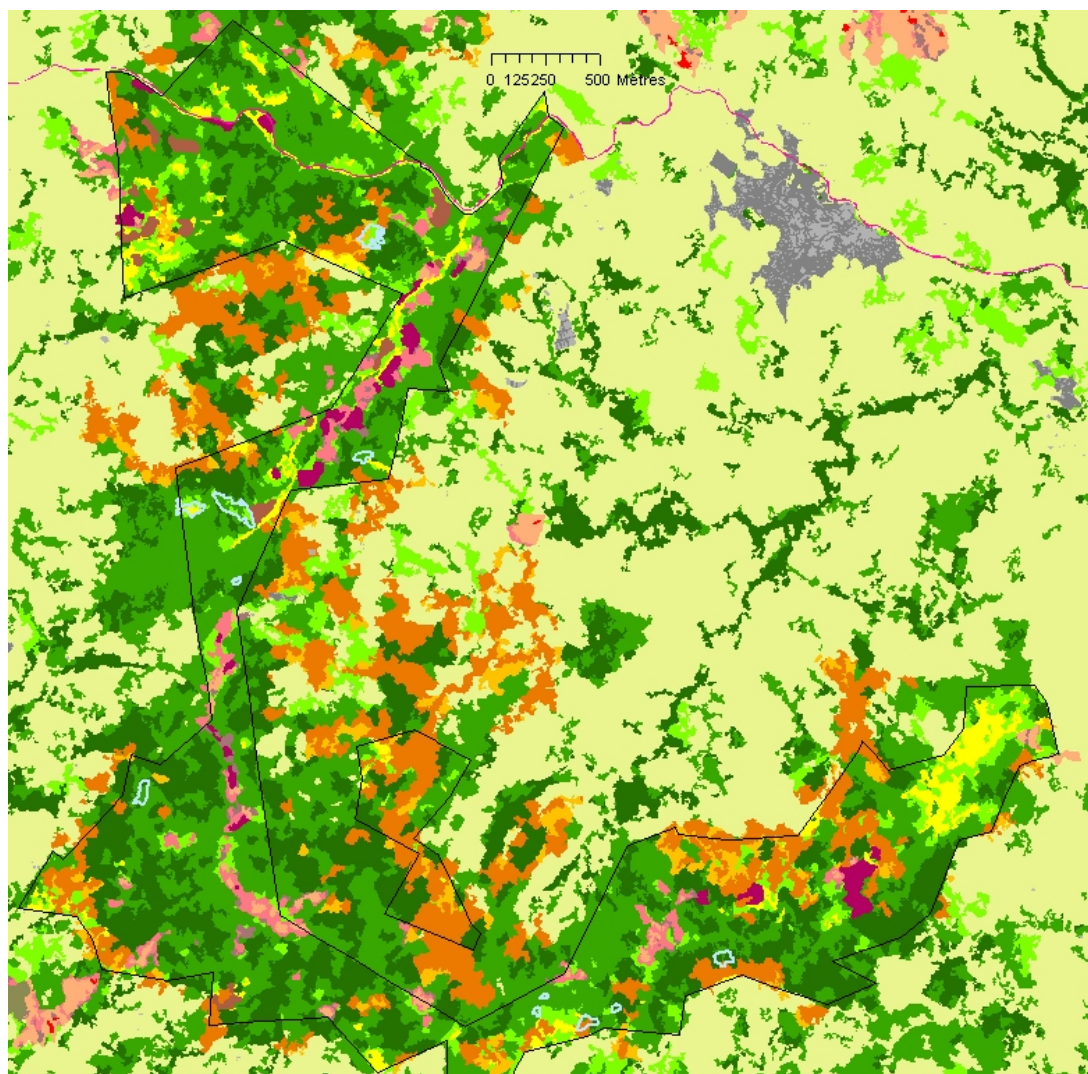


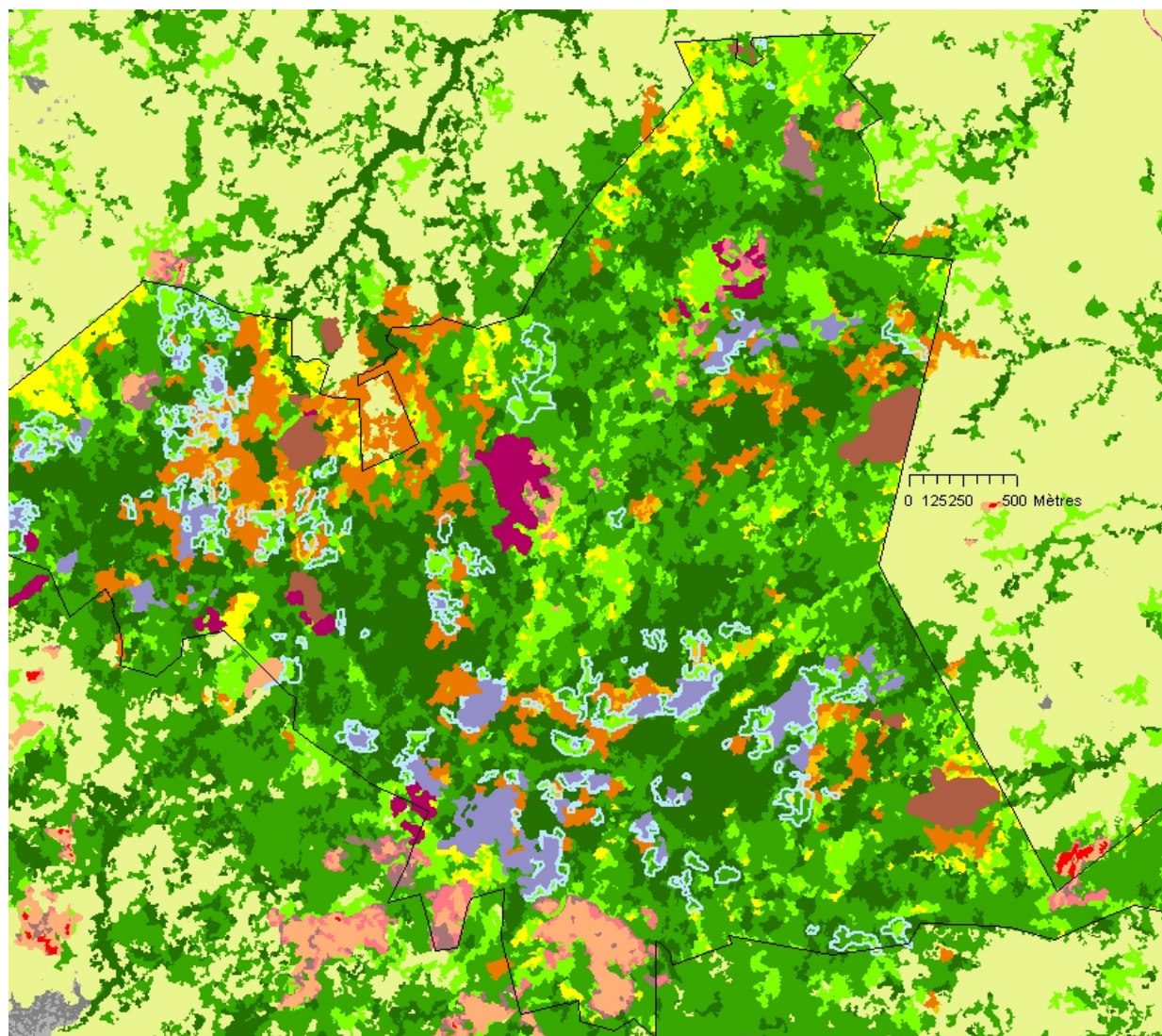
Figure 13 : Espaces à dominante boisée de Mayotte – Situation en 2008 :

Réserve Forestière de Sohoa
Mangroves de Tsingoni et de Zidakani



- | | |
|---|--|
| ■ Végétation basse (< 1,5m) ou arbustive claire (hors réserve forestière) | ■ Eau libre marine ou non marine |
| ■ Végétation basse (< 1,5m) en réserve forestière | ■ Plage, falaise ou rochers littoraux |
| ■ Peuplement arbustif ou arboré très clair | ■ Mangrove (hm ≤ 3m) |
| ■ Peuplement forestier (5m < hm < 10m) | ■ Mangrove (3m < hm ≤ 6m) |
| ■ Peuplement forestier (hm ≥ 10m) | ■ Mangrove (6m < hm ≤ 10m) |
| ■ Peuplement de réserve forestière (5m < hm < 10m) à hétérogénéité horizontale élevée | ■ Mangrove (hm > 10m) |
| ■ Peuplement de réserve forestière (hm ≥ 10m) à hétérogénéité horizontale élevée | ■ Tanne et mangrove supralittorale |
| ■ Tache de peuplement enliané effondré | ■ Sol nu sur padza |
| ■ Espace bâti | ■ Prairie sur padza |
| ■ Autre espace urbain ou artificialisé | ■ Fougèrerie sur padza |
| ■ Carrière, chantier ou décharge | ■ Buisson sur padza (hm < 1,5m) |
| ■ Route principale | ■ Peuplement homogène en <i>Acacia mangium</i> |
| ■ Hors zone d'étude | ■ Plantation en autre(s) essence(s) |
| | ■ Lianes non ou partiellement effondrées |

Figure 14 : Espaces à dominante boisée de Mayotte - Situation en 2008 : Réserve Forestière de Songoro Mbili



- | | |
|--|--|
| ■ Eau libre marine ou non marine | ■ Végétation basse (< 1,5m) ou arbustive claire (hors réserve forestière) |
| ■ Plage, falaise ou rochers littoraux | ■ Végétation basse (< 1,5m) en réserve forestière |
| ■ Mangrove (hm ≤ 3m) | ■ Peuplement arbustif ou arboré très clair |
| ■ Mangrove (3m < hm ≤ 6m) | ■ Peuplement forestier (5m < hm < 10m) |
| ■ Mangrove (6m < hm ≤ 10m) | ■ Peuplement forestier (hm ≥ 10m) |
| ■ Mangrove (hm > 10m) | ■ Peuplement de réserve forestière (5 m < hm < 10m) à hétérogénéité horizontale élevée |
| ■ Tanne et mangrove supralittorale | ■ Peuplement de réserve forestière (hm ≥ 10m) à hétérogénéité horizontale élevée |
| ■ Sol nu sur padza | ■ Tache de peuplement enliané effondré |
| ■ Prairie sur padza | ■ Espace bâti |
| ■ Fougèraie sur padza | ■ Autre espace urbain ou artificialisé |
| ■ Buisson sur padza (hm < 1,5m) | ■ Carrière, chantier ou décharge |
| ■ Peuplement homogène en <i>Acacia mangium</i> | ■ Lianes non ou partiellement effondrées |
| ■ Plantation en autre(s) essence(s) | ■ Route principale |
| | ■ Hors zone d'étude |

Figure 15 : Typologie des espaces à dominante boisée de Mayotte – Situation en 2008.
Réserve Forestière des Monts Bénara (extrait)

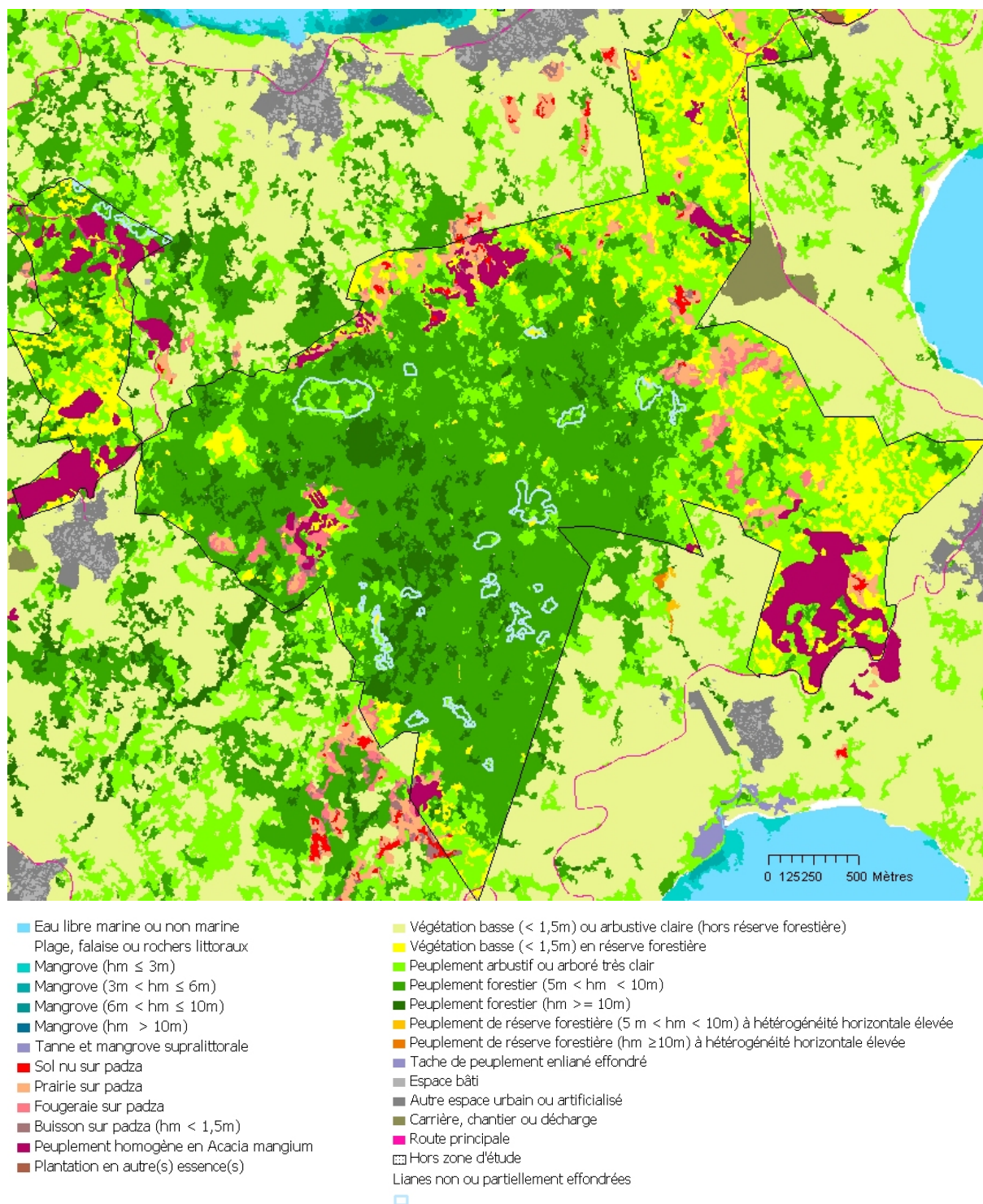


Figure 16 : Espaces à dominante boisée de Mayotte- Situation en 2008.

Réserve Forestière du Choungi.
Mangroves de Tsimkoura et de Dapani

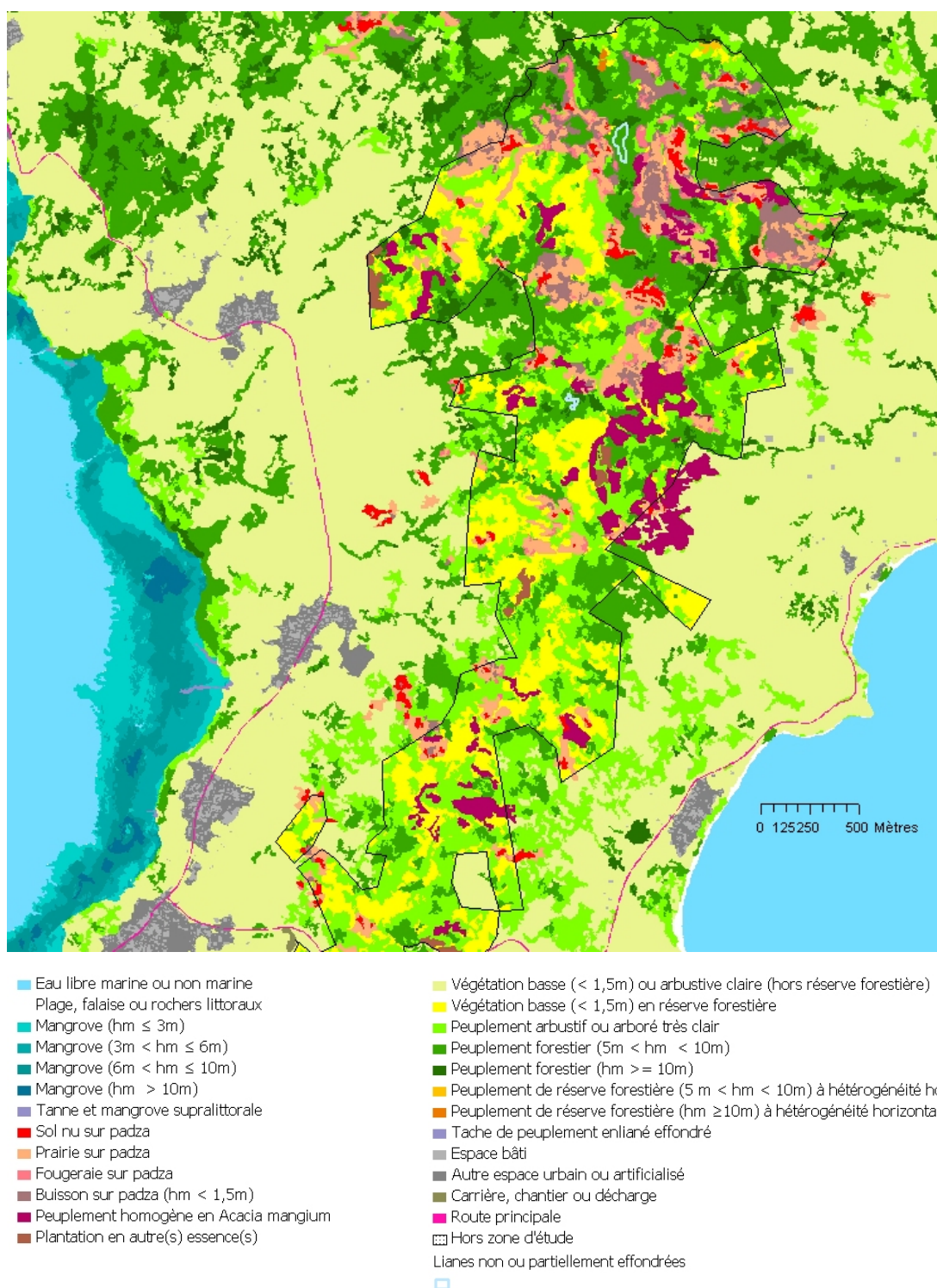


Figure 17 : Typologie des espaces à dominante boisée de Mayotte – situation en 2008 .
Réserve Forestière des Crêtes du Sud (extrait nord) et mangroves de Chiroungi - Miréréni

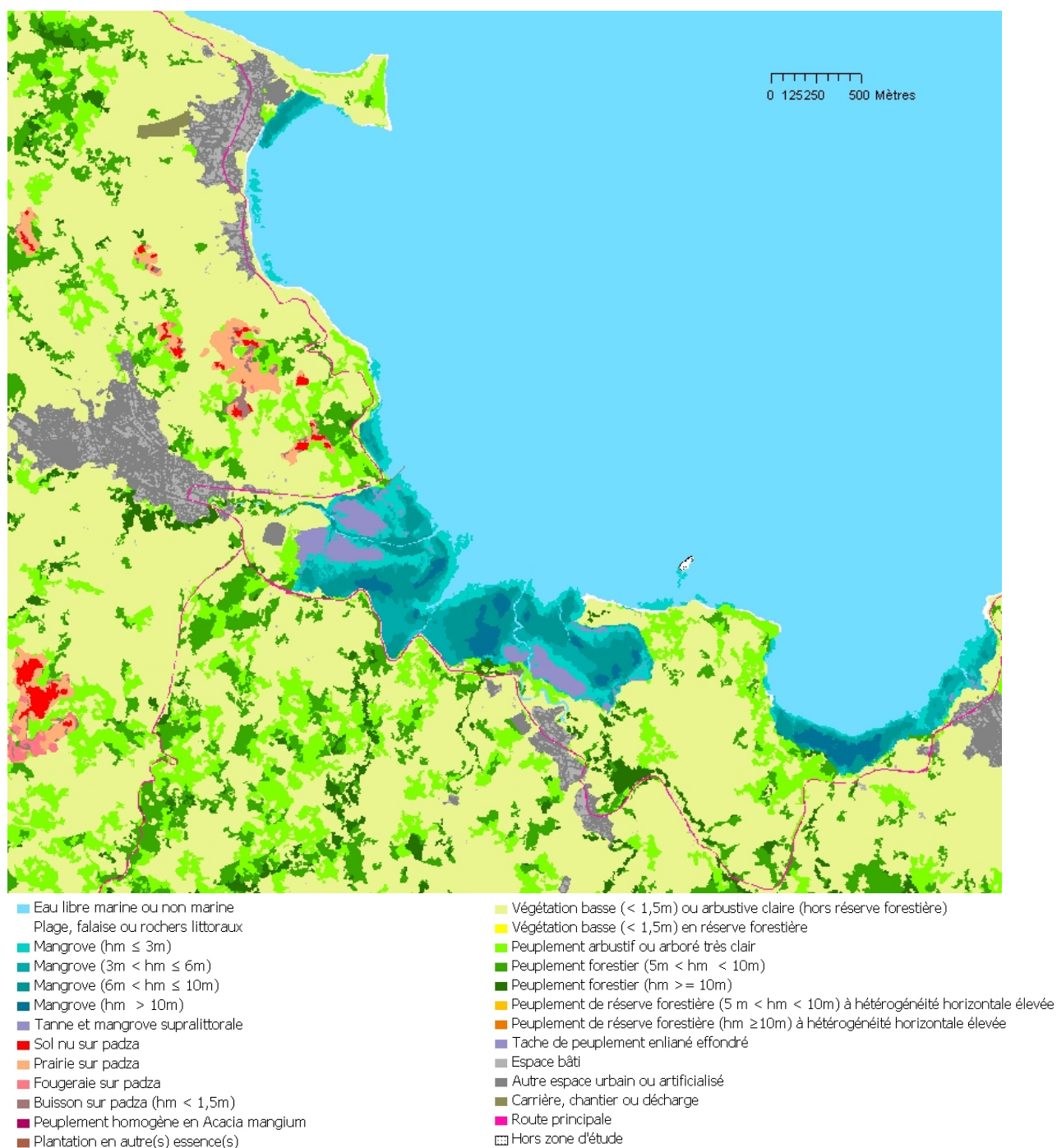


Figure 18 : Typologie des espaces à dominante boisée de Mayotte – Situation en 2008-

Mangroves de Dzoumonyé, Bouyouni et Longoni

3.5. – Produits statistiques

3.5.1. – Statistiques globales

Le tableau ci-dessous fournit l'état surfacique des postes typologiques distingués. Les proportions mentionnées ci-après se rapportent uniquement aux surfaces terrestres, dont l'ensemble cumulé correspond à une valeur de 37 400 ha

Tableau 1 : Surface associée à chacun des postes typologiques distingués

Postes typologiques	Surface (ha)
Eau libre marine ou non marine	37381
Plage, falaise ou rochers littoraux	230
Mangrove (hauteur moyenne inférieure ou égale à 3 m)	291
Mangrove (hauteur moyenne comprise entre 3 et 6 m)	182
Mangrove (hauteur moyenne comprise entre 6 et 10 m)	131
Mangrove (hauteur moyenne supérieure à 10 m)	32
Tanne et mangrove supralittorale	89
Sol nu sur padza	108
Prairie sur padza	570
Fougeraie sur padza	266
Buisson sur padza (hauteur moyenne inférieure à 1,5 m)	161
Peuplement homogène en <i>Acacia mangium</i>	282
Plantation en autre(s) essence(s)	70
Végétation basse (hauteur moyenne inférieure à 1,5 m) ou arbustive claire (hors réserve forestière)	17725
Végétation basse (hauteur moyenne inférieure à 1,5 m) en réserve forestière	483
Zone arbustive ou arborée très clair	4050
Espace boisé (hauteur moyenne comprise entre 5 et 10 m)	6387
Espace boisé (hauteur moyenne supérieure à 10 m)	2726
Peuplement de réserve forestière ou contigu (hauteur moyenne comprise entre 5 et 10 m) à hétérogénéité horizontale	106
Peuplement de réserve forestière ou contigu (hauteur moyenne supérieure à 10 m) à hétérogénéité horizontale	496
Tache de peuplement enligné effondré	64
Espace bâti	739
Autre espace urbain ou artificialisé	1776
Carrière, chantier ou décharge	59
Route principale	148
Ilots non cartographiés	433

Mangroves : 725 ha

Padzas : 1387 ha
(32 % en couvert ligneux)

Plantations : 352 ha

Couvert boisé naturel : 9715 ha

Le couvert boisé naturel, qui nous intéresse tout particulièrement dans cette étude, est de 9715 ha (9878 ha si l'on tient compte des mangroves de plus de 6 m), soit 25,9 % de la surface totale. Il est primordial de considérer qu'une telle surface cumulée, dont la valeur élevée tient au niveau de résolution très fin que nous avons adopté, n'est pas en mesure de traduire en tant que telle le caractère extrêmement morcelé de la couverture ligneuse mahoraise, qu'occulte parfois le visage arboré prédominant d'une grande partie des paysages mahorais.

La surface en mangroves est significative puisqu'elle atteint plus de 700 ha, le travail réalisé permettant en outre de distinguer différentes classes de hauteur au sein de cette catégorie, et de disposer dès lors de données très appréciables pour des études ultérieures dans ce domaine. Une analyse plus fine est nécessaire, de la part de spécialistes de la mangrove, pour préciser si la répartition surfacique des hauteurs traduit ou non une dynamique favorable au sein de ces mangroves.

Le taux de couverture ligneuse sur padzas, représenté par « l'embuissonnement » naturel (161 ha) et les plantations (282 ha), est d'environ un tiers, ce qui est une valeur appréciable et encourageante, car elle confirme que le traitement des padzas, tout au moins dans ses formes d'érosion les moins vives, est tout à fait réaliste et efficace. La surface totale de 1387 ha est délicate à confronter à des données antérieures, dans la mesure où les modalités utilisées pour évaluer les « surfaces en padzas » sont rarement explicitées de façon précise.

Le chiffre de 352 ha représenté par l'ensemble des plantations est conforme aux évaluations réalisées par le SRF.

Le véritable couvert boisé, observé presque exclusivement au sein des réserves forestières, ne représente en réalité que 8 % de la surface de Mayotte, quand la partie boisée rassemblant les ripisylves, les très petits fragments forestiers observés hors réserves et les parcelles agroforestières à couvert fermé, représente 15 % de la surface totale (voir graphique ci-contre).

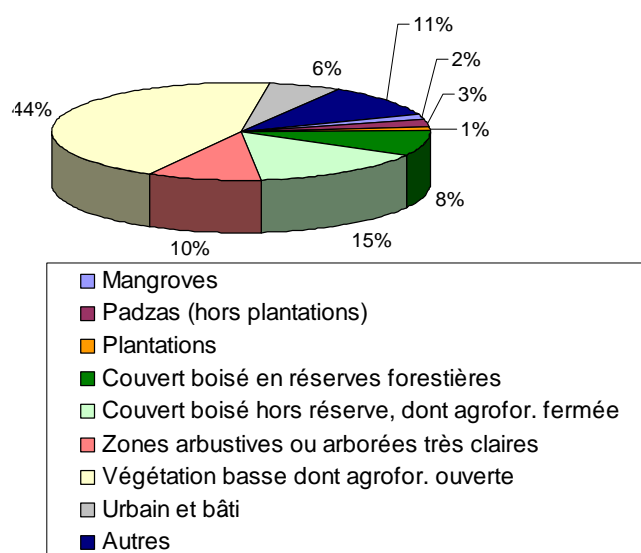


Figure 19 : Distribution des principaux postes typologiques

Les peuplements de réserves forestières, ou contigus à ces dernières, et présentant une hétérogénéité horizontale élevée correspondent à des zones anciennement ouvertes, le plus souvent caractérisées par la présence d'espèces arborées exotiques (ex : manguiers). Ils représentent une surface de 602 ha et justifieraient en soi des modalités de gestion propres.

3.5.2. – Situation dans les réserves

Le tableau ci-dessous fait apparaître des situations contrastées entre les réserves.

La Réserve des Crêtes du Nord est la plus affectée par l'érosion en padza, avec notamment un taux de surface en érosion active s'élevant à 1,7 %, mais aussi les taux les plus élevés pour les postes dits « prairie sur padza » et « fougère sur padza ».

De manière cohérente, cette réserve partage avec celle des Crêtes du Sud les taux les plus élevés en plantations en *Acacia mangium* (respectivement 5,2 et 6,7 %).

La Réserve du Benara concentre quant à elle une proportion élevée des plantations en autres essences effectuées au sein des réserves (24 ha sur un total de 58 ha en réserves, soit 41 %).

Tableau 2 : Situation par réserve et éléments remarquables

	Crêtes du Nord		Benara		Majimbini		Sohoha		Songoro-Mbili		Crêtes du Sud	
Postes typologiques	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Sol nu sur padza	10	1,7	0	0,0	1	0,1	2	1,0	0	0,0	13	0,9
Prairie sur padza	45	7,5	17	1,2	26	2,1	12	5,6	5	0,9	76	5,1
Fougère sur padza	37	6,3	12	0,8	43	3,4	5	2,5	17	3,1	21	1,4
Buisson sur padza (hm < 1,5 m)	11	1,9	11	0,8	16	1,3	6	2,8	5	0,9	30	2,0
Peuplement homogène en <i>Acacia mangium</i>	31	5,2	18	1,3	40	3,1	2	1,2	12	2,1	100	6,7
Plantation en autre(s) essence(s)	6	1,0	24	1,7	16	1,3	0	0,2	7	1,2	5	0,3
Végétation basse (hm < 1,5 m) ou arbustive claire (hors RF)	1	0,1	1	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,1	2	0,1
Végétation basse (hm < 1,5 m) en RF	99	16,6	67	4,8	41	3,2	2	1,1	34	6,0	239	16,0
Zone arbustive ou arborée très claire	121	20,1	195	13,9	106	8,3	19	9,3	52	9,1	376	25,2
Espace boisé (hm 5-10 m)	144	24,0	549	39,2	347	27,3	86	41,7	228	40,0	560	37,5
Espace boisé (hm > 10 m)	93	15,6	346	24,7	446	35,1	70	33,7	138	24,2	68	4,5
Peuplement de RF ou contigu (hm 5-10 m) à hétérogénéité horizontale élevée	0	0,0	18	1,3	30	2,4	0	0,1	13	2,2	0	0,0
Peuplement de RF ou contigu (hm > 10 m) à hétérogénéité horizontale élevée	0	0,0	90	6,4	149	11,7	2	0,8	57	10,0	0	0,0
Tache de peuplement enligné effondré	0	0,0	53	3,8	11	0,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0

En cohérence avec l'état dégradé déjà mentionné des Réserves des Crêtes du Nord et du Sud, c'est aussi là que l'on observe les proportions les plus élevées en végétation basse (respectivement 16,6 et 16,1 %), mais également en végétation arbustive ou arborée très claire (respectivement 20,1 et 25,2 %).

Inversement, les autres réserves recouvrent des proportions élevées et des surfaces étendues en espaces boisés. La Réserve du Majimbini apparaît de manière singulière par sa richesse en peuplements forestiers de plus de 10 m, dont la proportion (35,1 %), mais aussi la surface cumulée (446 ha) est la plus élevée parmi les réserves. En revanche, cette même réserve présente également le taux de peuplement de plus de 10 m à hétérogénéité horizontale le plus élevé entre réserves (11,7 %), ce qui traduit très vraisemblablement d'anciens défrichements.

3.5.3. – Problématique particulière de l'enlèvement

Les éléments statistiques relevant de l'enlèvement au sein des réserves forestières et reportés dans le graphique ci-contre et le tableau ci-après revêtent une dimension particulièrement préoccupante. Ils montrent notamment que la réserve du Bénara est particulièrement affectée, en relation certainement avec les fortes pentes que l'on y observe et dont on sait qu'elles s'avèrent prédisposantes à l'enlèvement. Ils révèlent en outre que la proportion des surfaces effondrées est, à l'exception de la réserve forestière de Majimbini, particulièrement élevée.

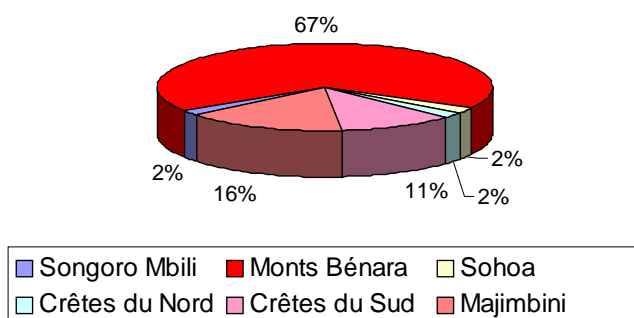


Figure 20 : Pourcentage d'enlèvement au sein des réserves forestières

Une telle situation laisse présager d'une évolution semble-t-il inéluctable si rien n'est fait pour enrayer l'extension du processus, par des interventions localisées soit au sein même des zones enlignées, soit en bordure immédiate de celles-ci pour éviter qu'elles ne s'étendent.

Enfin, ces données sont d'autant plus alarmantes que les zones enlignées non effondrées, difficiles à identifier et à circonscrire à partir des photos aériennes en couleurs et images satellitaires, ont pu être sous-estimées. De ce fait, il faut aussi admettre que le suivi de l'évolution des surfaces enlignées restera très délicat, et donc incertain.

Tableau 3 : Superficies en lianes effondrées et non effondrées par réserve

Réserve forestière	Non effondré (ha)	Effondré (ha)	Total
Songoro Mbili	4	0	4
Monts Bénara	83	53	136
Sohoa	4	0	4
Crêtes du Nord	4	0	4
Crêtes du Sud	23	0	23
Majimbini	22	10	32
Total	140	63	203

4. – Validation de la démarche

4.1. – Points de contrôle

Une mission a été réalisée du 18 au 27 Janvier 2010 par Stéphane DUPUY, Gérard LAINÉ et Jacques TASSIN afin d'assurer, au cours de déplacements sur le terrain et en fonction des conditions météorologiques, des vérifications de l'ajustement entre la typologie obtenue par traitement numérique des données, et les situations observées *de visu*.

L'essentiel de cette mission a donc consisté à confronter la réalité actuelle du terrain aux types de végétation tels que nous les avons cartographiés. Les points de contrôle ont été choisis de manière à :

- Couvrir la diversité des situations géographiques de l'île mais aussi des postes typologiques définis ;
- Evaluer notamment la pertinence des postes typologiques relevant des réserves forestières (contrôles réalisés dans la RF du Bénara) ;
- Clarifier certains points particuliers (ex : effet possible de la présence d'espèces décidues tels les bois noirs, ou d'arbres élevés à faible houppier, tels les cocotiers).

De manière complémentaire, ces déplacements ont permis de compléter:

- L'échantillon d'observations de lianes sur canopée non effondrée, la possibilité de déceler la présence de lianes par télédétection apparaissant néanmoins minime ;
- Les clichés destinés à composer la photothèque.

Un jeu de 110 points (figure 21) a ainsi fait l'objet de contrôles. Seuls quelques rares points correspondant à des espèces décidues (bois noirs, baobabs...) ou à certaines plantations de cocotiers peu denses n'ont pas été classés dans les bonnes classes de hauteur au terme de la classification numérique basée sur l'utilisation du MNH.

Enfin, une vérification visuelle complète et systématique a été réalisée sur l'ensemble du territoire (phase de post-classification, paragraphe 2.3.10.).

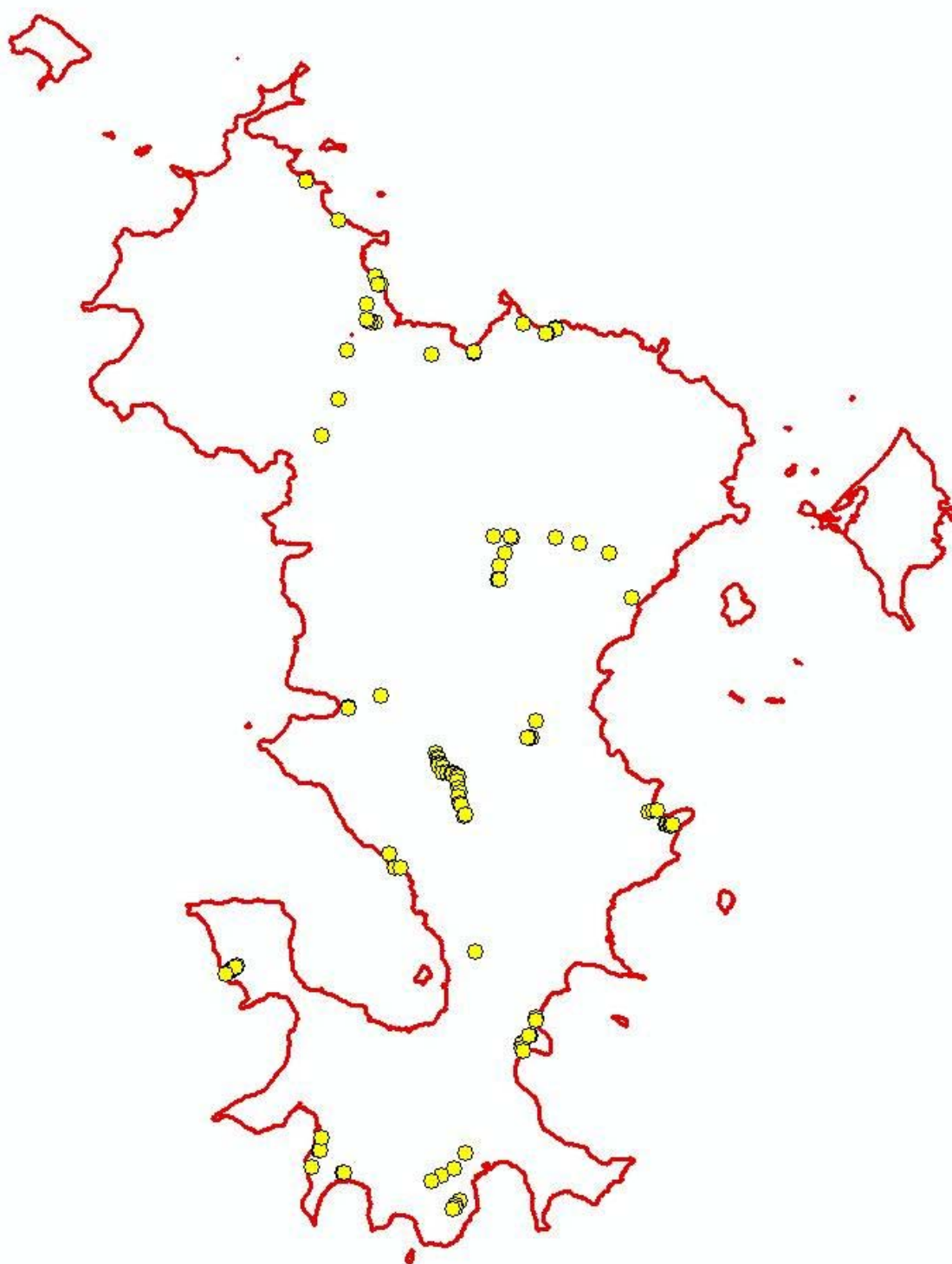


Figure 21 : Localisation des points de contrôle (janvier 2010)

4.2. – Mise en relation avec les relevés de végétation sur placettes et appréciation de la pertinence des seuils de hauteur retenus

Les 62 relevés de végétation réalisés en réserves forestières (Majimbini, Hachiroungou, Combani, Benara, Sohoa, Choungui, mais aussi Saziley) ont fait l'objet d'une première analyse.

Les analyses réalisées relèvent :

- De l'analyse globale de ces relevés (ordination de ces relevés selon des gradients écologiques), qui met en évidence un gradient principal d'ouverture-fermeture des milieux, et un gradient secondaire lié aux ressources hydriques ;
- De la caractérisation des postes typologiques ainsi renseignés (l'identité de ces postes est apparue *a posteriori* dès lors que l'utilisation tardive du MNH dans la typologie a conduit à réviser la typologie préalable prédéfinie lors de la mission d'octobre, mais révisée depuis).

La classification numérique n'ayant été finalisée que la semaine précédant la dernière mission de terrain, les liens entre cette classification basée sur la structure de la végétation d'une part, et la composition floristique d'autre part, ne sont pas apparus au premier abord. L'écrasante prédominance d'espèces très communes dans la composition floristique (ex : *Grisollea myrianthea*) rend certaines analyses statistiques inopérantes, notamment les procédés de classification automatique après lissage préalable des données (ex : Classification Ascendante Hiérarchique, consécutivement à une Analyse en Composantes Principales).

Au cours de la dernière mission de terrain en janvier 2010, et notamment à l'occasion de la sortie assurée à l'Ouest de la Réserve Forestière du Bénara, des différences ont néanmoins été pressenties sur le terrain, de sorte que des investigations nouvelles sur les jeux de données réunis lors de la mission d'octobre ont permis de mettre en lumière des différences inter-types dans la composition floristique. De premières illustrations en ont été présentées lors du Comité Technique réuni le 26/01, et appellent certains commentaires, comme le font ressortir par exemple les trois figures suivantes.

Tout d'abord, la première figure qui apparaît ci-après fait apparaître que la composition floristique des forêts mahoraises est structurée selon deux gradients principaux qui correspondent aux deux axes principaux de l'Analyse en Composante Principales des données floristiques (exprimées en nombre d'individus de plus de 1 m de haut).

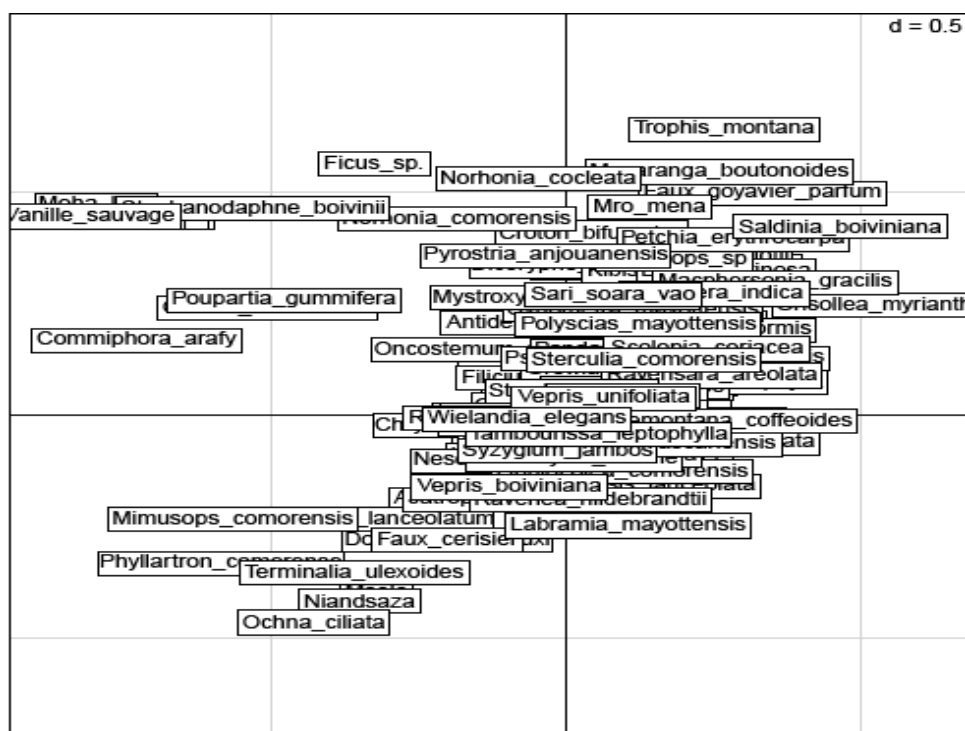


Figure 22 : Position des espèces rencontrées sur le plan factoriel principal de l'ACP

Le premier axe (axe des abscisses) correspond à un gradient de ressources lumineuses (espèces de zones ouvertes à gauche, espèces de zones fermées à droite). Le second axe (axe des ordonnées) peut quant à lui s'interpréter comme un gradient d'humidité (espèces de zones sèches au bas de l'axe, espèces de zones humides en haut de l'axe). Dans les situations intermédiaires situées au centre de la figure, et donc dans la partie médiane des deux gradients, on relève des espèces de la forêt dite de transition (ex : *Filicium decipiens*). On observe en outre que les espèces caractéristiques des forêts humides sont très proches les unes des autres lorsqu'on les positionne sur un plan défini par les deux gradients écologiques principaux qui en ordonnent la composition.

En revanche, des déterminants spécifiquement liés à la structure, dont il faut considérer qu'ils ne sont probablement pas sans lien avec (i) le stade de dynamique forestière en place (ii) et le niveau de dégradation éventuellement subi, et donc à l'histoire de la végétation en place plus qu'à la station forestière elle-même, laissent apparaître une possible différenciation des cortèges floristiques.

Avant même le déroulement de la campagne de description des points de vérification, conduite lors de notre troisième mission en janvier 2010, nous avons cherché à apprécier la pertinence des seuils de hauteur retenus.

Une première démarche d'appréciation a, dans un premier temps, consisté à confronter l'état cartographié de cette classification à la connaissance dont nous disposons de la végétation de Mayotte, basée sur les éléments accumulés dans notre mémoire, mais également sous la forme des premiers travaux de digitalisation que nous avons conduits au cours du dernier trimestre 2009 à partir des orthophotos. Cette confrontation apparut d'autant plus fructueuse et satisfaisante que la méthode numérique retenue fournissait une cartographie qui s'accordait pleinement avec nos

travaux préalables, et révélait de surcroît des unités que nous n'avions pas identifiées à part entière lors de cette phase de digitalisation, comme par exemple la végétation croissant en lignes de crête, caractérisée une faible hauteur et épousant de manière remarquable la topographie des lieux. Une démarche complémentaire a consisté à mobiliser les relevés de végétation dont nous disposions pour vérifier une nouvelle fois la cohérence entre approche numérique et approche de terrain.

La figure représentée ci-après confirme la cohérence des distinctions établies numériquement, pour des relevés réalisés dans la Réserve Forestière de Majimbini.

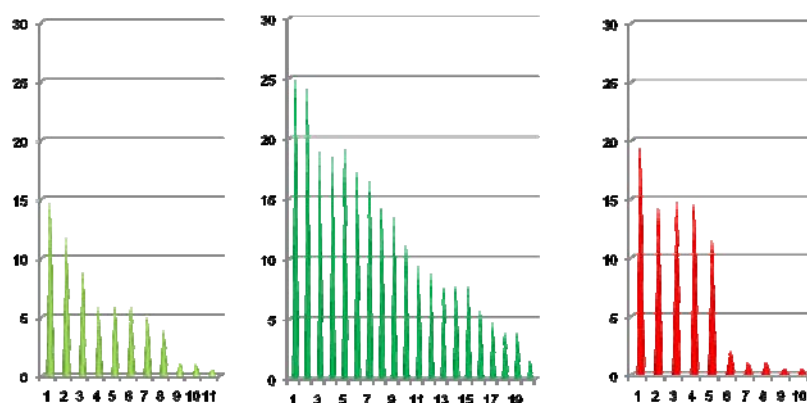


Figure 23 : Distribution des hauteurs maximales des individus pour chaque espèce forestière présente dans des relevés du Majimbini. A gauche : $5 < H_m < 10,5$ m, hétérogénéité horizontale faible. Au milieu : $H_m > 10,5$ m, hétérogénéité horizontale faible. A droite : $5 < H_m < 10,5$ m, hétérogénéité horizontale élevée.

De manière relativement similaire, mais dans une démarche cependant davantage prospective, nous avons exploré la possible variabilité de la composition floristique selon les différents types identifiés de manière numérique.

De manière plus inattendue, nous avons relevé des spécificités floristiques propres à chacun des types présents en forêt naturelle, comme cela est illustré par la figure 22 qui présente notamment comment les types forestiers identifiés dans les forêts humides se recouvrent ou non (toutes les espèces présentes dans les relevés n'ayant pas été reportées, de manière à ne pas rendre cette figure illisible). On retrouve, à l'intersection des trois types en présence, les espèces « hyper-communes », tandis que d'autres espèces, moins communes, apparaissent spécifiques de l'un ou l'autre de ces trois types (T_5 : formations boisées à hauteur moyenne supérieure à 10,5 m et à structure homogène ; T_6 : formations boisées à hauteur moyenne supérieure à 10,5 m et à structure hétérogène, T_7 : formations boisées à hauteur moyenne comprise entre 6 m et 10,5 m et à structure homogène). Ceci confirme bien ce qui avait déjà été observé lors d'une étude précédente menée sur la réserve de Songoro Mbili (Adell, 2005).

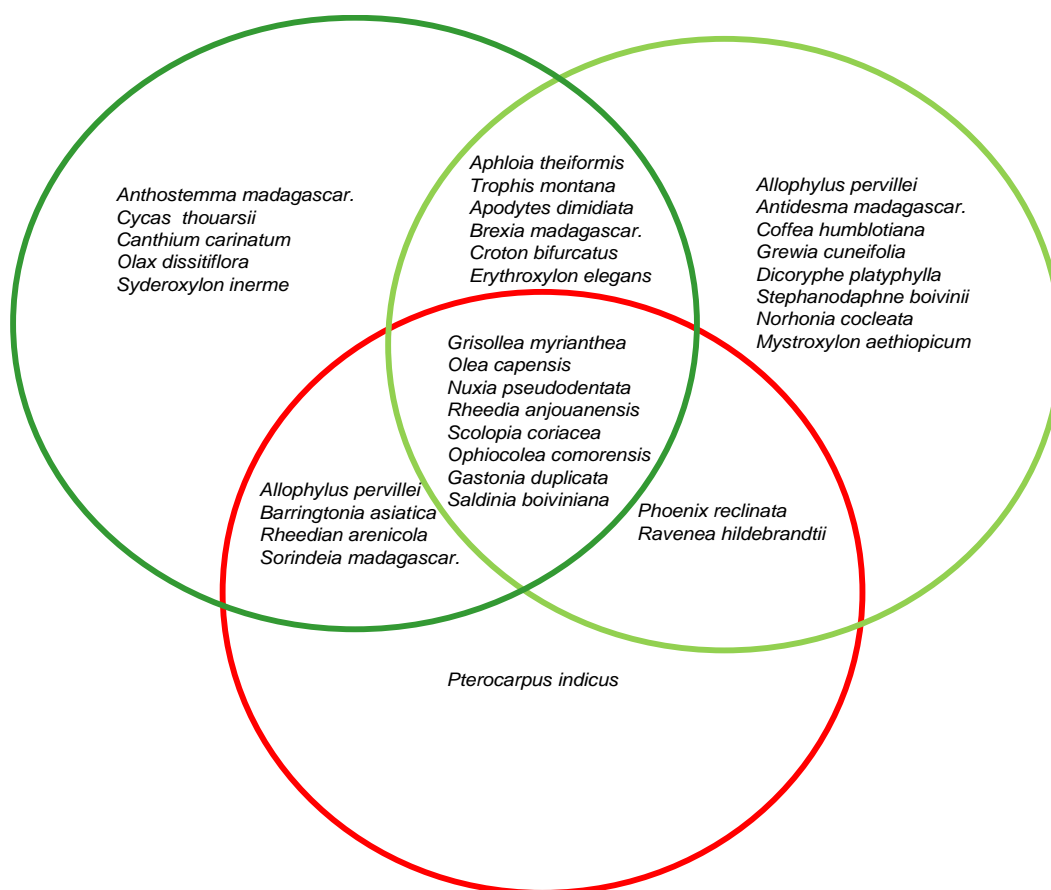


Figure 24 : Distribution des hauteurs maximales des individus pour chaque espèce forestière présente pour l'ensemble des relevés réalisés en forêt dense humide. En vert foncé : $5 < H_m < 10,5$ m, hétérogénéité horizontale faible. En vert clair : $H_m > 10,5$ m, hétérogénéité horizontale faible. En rouge : $5 < H_m < 10,5$ m, hétérogénéité horizontale élevée.

5. – Fiches botaniques et Photothèque.

Cette approche de la végétation a été au demeurant complétée par la réalisation d'un ensemble de 51 fiches botaniques préparées par Jean-Michel SARRAILH au titre de la nécessaire familiarisation des experts forestiers à la flore mahoraise indigène. Ces fiches, dont la trame avait été présentée lors du Comité Technique de la précédente mission, et bien que non prévues dans les TDR, seront annexées au rapport final. Un exemple en est fourni ci-dessous.

Aphloia theiformis
APHLOIACEAE


Arbuste ou petit arbre
Ecorce se détachant en plaques
Feuilles simples, alternes

Limbe :

- obovale ou elliptique
- sommet obtus à subacuminé
- marge denticulée à dentée
- base cunéiforme

Inflorescences variables (fleurs solitaires, fascicules, grappes)
Fleurs sépales blancs, nombreuses étamines
Fruits : baies blanches, ovoïdes

Mfandrabo



Ces fiches s'inscrivent dans la continuité d'un travail préalable réalisé par la DAF et le complètent (éditions FFN pour le 150ème anniversaire du rattachement de Mayotte à la France (1991).

Une photothèque a été parallèlement constituée afin d'illustrer chacun des postes de la nomenclature retenue. La plupart de ces photos sont directement liées à la base de données créée dans le cadre de la campagne de relevés effectuée en août 2009.

BILAN

La fourniture du MNH (Modèle Numérique de Hauteurs), dont l'utilisation n'avait été certes pas prévue dans les TDR de l'étude, s'est avérée néanmoins offrir de nouvelles perspectives dans la mesure où cet outil permet de prendre en compte non seulement les hauteurs, mais leur distribution statistique, mais aussi spatiale, au sein des différents types forestiers appréhendés.

L'approche structurale, appuyée par l'utilisation du MNH, s'est donc présentée comme l'une des clés de notre typologie, dans la mesure où elle offrait l'avantage de pouvoir s'appuyer sur des données premières indépendantes des regards des catégories d'utilisateurs qui s'y rattachent (forestiers, naturalistes, conservateurs). Il s'agissait donc de se rapprocher d'une typologie de structure, en s'appuyant autant que possible, mais de manière néanmoins réaliste, sur des typologies existantes (ex : ONF, IFEN).

En outre, les déplacements sur le terrain, dont les sites ont été choisis après photo-interprétation, font apparaître un meilleur état qu'attendu des surfaces supposées dégradées. Certaines unités envisagées d'après l'examen de leur canopée comme purement secondaires se sont révélées en réalité tellement proches de forêts primaires (ou présumées comme telles) qu'il convient de reconnaître à leur égard un degré de naturalité justifiant des actions d'aménagement spécifiques de ce type de milieu.

BIBLIOGRAPHIE

- ADELL C. (2005). *Etude statistique et cartographique des données sur la réserve forestière de Songoro Mbili*. Bureau d'étude INENV/ DAF, Mamoudzou, 40p..
- ADJANOHOUN E.J., KE ASSI LO., AHMED A., EYME J., GUNKO S., KAYONGA A., KEITA A., LEBRAS M. (1982). *Contribution aux études ethnobotaniques et floristiques aux Comores*. ACCT, 216 p.
- AUTFRAY P., HUAT J., VALLÉE G. (2002). Gestion durable de l'agriculture de l'environnement et de la forêt. Comité tripartite, Mamoudzou le 21 novembre 2002. Axe 2. Montpellier, CIRAD-CA, 25 p.
- BARTHELAT F., M'CHANGAMA M., ALI SIFARI B. (2006). *Atlas illustré de la flore protégée de Mayotte*. Version B06-06. DAF Mayotte, 53 p.
- BOSSER J., CADET T., GUÉHO J., MARAIS W. (1976-2004). *Flore des Mascareignes [La Réunion, Maurice, Rodrigues]*. Sugar Industry Research Institute (Mauritius), Institut de Recherche pour le Développement (IRD, Paris), Royal Botanic Gardens (Kew).
- BOULLET V. (2007). *Carte de la végétation et des habitats de Mayotte. Massif de Sohoa et baie de Tsingoni*. CBNM, Mayotte, 24 p.
- BOULLET V. *et al.* (2005). *Mayotte : Biodiversité et évaluation patrimoniale*. Rapport pour le compte de la Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte, 324 p. + annexes.
- BOUREAU J-G., (1992). *Analyse par télédétection de formations forestières hétérogènes*. Thèse Université Montpellier II, 162 p.
- BOUTTEMY F., FERLAT B., FERLAT C., GUIOT V. (2004). *Guide de la flore de Mayotte*. Association des naturalistes de Mayotte, Mamoudzou, 158 p.
- BOZZA J.L., CHAMSSIDINE H. (2008). *Lutte contre l'érosion des sols à Mayotte : fiches techniques* (version 2, mai 2008). Cirad, Montpellier, 22 p.
- BOZZA J.L., HUAT J., CHAMSSIDINE H. (2008). Mayotte – érosion des sols : interrogations pour l'avenir. *Univers Maoré* (9) : 36-43.
- CABALLÉ G. (1996). *Les lianes et les forêts de Mayotte*. Rapport de mission. CTM/DAF/SEF-USTL Montpellier, 37 p.
- DAF (2003). *Arbres et plantes de Mayotte – fiches botaniques*. Mamoudzou, 102 p.
- DEJARDIN J., GUILLAUMET J.L., MANGENOT G. (1973). Contribution à la connaissance de l'élément non endémique de la flore malgache (végétaux vasculaires). *Candollea*, 28 : 325-391.
- FAUJOUR A. (2002). *Pharmacopée traditionnelle populaire des Comores*, 248 p.
- FERET J.-B. (2004). *Etude de l'érosion de trois types de zones sensibles lors de la saison des pluies*. Mémoire de Diplôme d'Ingénieur : ENSA, Montpellier, 63 p.
- FERET, J.-B., SARRAILH J.-M. (2005). Utilisation d'un appareil de mesure simple, et précis, pour l'étude de l'érosion à Mayotte. *Bois et Forêts des Tropiques* 286 : 29-40
- FRIEDMANN F. (1994). *Flore des Seychelles, Dicotylédones*. Collection Didactiques, ORSTOM Editions, 663 p.
- GABOLDE S. (2008). *Cartographies multi-échelles et multi-temporelles sur l'île de la Grande Comore*. Rapport de projet pluridisciplinaire- ENSG 2eme année (IT2), 59p
- GACHET C. (1969). *Etude des problèmes forestiers de l'archipel des Comores*. Rapport CIRAD Montpellier, 177 p.
- GUIOT V. (2002). Les plantes médicinales au quotidien. *Naturalistes, Historiens et Géographes de Mayotte*, 6 : 20-37.
- HASSANI M. (2009). *Les occupations agricoles coutumières en zones de réserves forestières*. Mémoire de Licence Professionnelle. Université de Strasbourg, 42 p.
- IEDOM (2009). *Mayotte : rapport annuel 2008*. 178 p.

- JACQ F., HLADIK A., BELLEFONTAINE R. (2005). Dynamique d'un arbre introduit à Mayotte, *Litsea glutinosa* (Lauraceae) : une espèce envahissante ? *Revue d'Ecologie (Terre Vie)* 60(1) : 21-31.
- LABAT J.N., PASCAL O. (2000). Two new species of *Cynometra* (Leguminosae: Caesalpinioideae) from Mayotte on the Comoro Archipelago. *Kew Bulletin*, 54(1) : 163-169.
- LABAT J.N., PIGNAL M., PASCAL O. (1999). Trois espèces nouvelles d'Oleaceae et note sur la présence d'*Olea capensis* dans l'Archipel des Comores. *Novon*, 9 : 66-72.
- LUDWIG N. (1999). Notes on the Palms of Mayotte, Comori Islands, Indian Ocean. *Palms*, 43(3) : 149-151.
- PADD (2004). *Plan d'Aménagement et de Développement Durable de Mayotte*. Conseil Général, Mamoudzou, 113 p.
- PASCAL O. (1997). *La végétation naturelle à Mayotte : études quantitatives et qualitatives*. Rapport interne CTM/DAF/SEF, 90 p.
- PASCAL O. (2002). Plantes et forêts de Mayotte. MNHN, DAF Mayotte, Paris, 108 p.
- RAUNET M. (1992). *Les facteurs de l'érosion des terres et de l'envasement du lagon*. Direction de l'Agriculture de Mayotte, Cirad-ca, Montpellier, 68 p.
- RIOU R., SEYLER F. (1995). *Contribution du sol dans la réflectance proche infrarouge de la forêt tropicale sur images SPOT*. C.R Acad.Sci.Paris., t.320, série II a, p 1079-1086
- SOURISSEAU J-M., BONNAL, P. & BURNOD P. (2008). *Changement institutionnel et agriculture à Mayotte*. Économie rurale 1/2008 (n° 303-304-305), p. 60-74.
- VIETTI VIOLI C.(2007). *Exploitation de données lidar à haute résolution pour la foresterie*. Travail de Master, LaSIG, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 75 p.+ annexes
- WEIBEL T. (1997). *Inventaire des espèces fruitières comestibles de Mayotte*. CIRAD-SAR (Montpellier), 47 p

TYPOLOGIE DES ESPACES BOISES DE MAYOTTE

Rapport final de la phase 2

Suivi de l'évolution spatiale et temporelle des espaces boisés

Gérard Lainé, Stéphane Dupuy,
Jacques Tassin & Nicolas Fauvet



Les points de vue exprimés dans ce document sont ceux du consultant et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union Européenne ou du Gouvernement de Mayotte

OBJET DU RAPPORT.....	85
PREMIERE PARTIE : APPORT DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT 5 POUR LE SUIVI DE L'EVOLUTION DES ESPACES BOISES.....	86
INTRODUCTION.....	86
1 – PRÉLIMINAIRE : RÉSULTATS OBTENUS PAR ANALYSE COMPARATIVE DES IMAGES SPOT 5 DU 30 JUIN 2005 ET DU 7 OCTOBRE 2009.....	87
1.1 – CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES.....	87
1.2 – CLASSIFICATION NON SUPERVISÉE.....	87
1.3 – CLASSIFICATION SUPERVISÉE.....	89
1.4 – ANALYSE VISUELLE DES DEUX IMAGES.....	90
2 – RÉSULTATS OBTENUS PAR ANALYSE COMPARATIVE DES IMAGES SPOT 5 DU 15 OCTOBRE 2003 ET DU 7 OCTOBRE 2009.....	92
2.1 – CHANGEMENTS INTERVENUS DANS LE DOMAINE DU MIR (MOYEN INFRA- ROUGE).....	93
2.2 – CHANGEMENTS INTERVENUS DANS LA VALEUR DE L'INDEX DE VÉGÉTATION.....	96
3 – ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES ESPACES BOISÉS PAR ANALYSE COMPARATIVE DE L'IMAGERIE SPOT 5 DU 7 OCTOBRE 2009 ET DE LA CARTOGRAPHIE DE LA SITUATION 2008.....	98
4 – BILAN.....	101
5 – PROPOSITIONS.....	101
 DEUXIEME PARTIE : COMPARAISON ENTRE LA CARTOGRAPHIE OBTENUE (2009) ET L'ANALYSE DES SCANS DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES D'ARCHIVES DE L'IGN (1950).....	 104
INTRODUCTION.....	104
1. - METHODES.....	105
1.1. – ZONE D'ÉTUDE.....	105
1.2. – ANALYSE DIACHRONIQUE	106
2. – RÉSULTATS.....	108
3. – ÉLÉMENTS DE DISCUSSION.....	110
3.1. – MISE EN DÉFAUT DE L'UTILISATION DU NDVI	111
3.2. – FACTEURS BIOLOGIQUES DE RECONQUÊTE FORESTIÈRE.....	112
3.3. – FACTEURS SOCIO-ÉCONOMIQUES DE RECUL DE LA FORÊT	113
3.4. – UNE PERTE D'INTÉGRITÉ FORESTIÈRE ?.....	113
BIBLIOGRAPHIE	115

OBJET DU RAPPORT 4

Le présent rapport s'inscrit dans le projet *Typologie des espaces à dominante boisée de Mayotte* dont le pouvoir adjudicateur est le Conseil Général de Mayotte, réalisé conformément à la lettre de commande signée le 22-05-2009 entre le CIRAD et AGRIFOR Consult SA, leader du consortium Agrifor Consult., qui elle-même fait suite à la demande de prestation N° 2009/203776 du contrat-cadre Bénéficiaires EUROPEAID (lot 6 : environnement).

Ce rapport clôt la phase 2 de l'étude, intitulée « Suivi de l'évolution spatiale et temporelle des espaces naturels ».

Le délai de livraison de ce rapport résulte d'une modification de certains termes de l'étude au cours du projet, au bénéfice d'un surcroît de qualité et de précision dans les résultats fournis en phase 1, mais exigeant une surcharge de travail qui a induit de nécessaires ajustements pour le déroulement de la phase 2.

Pour la première partie, il était prévu à l'origine de comparer les résultats de la classification de l'imagerie satellitaire retenue pour l'étude (SPOT 2005) (document de référence temporel), avec ceux obtenus selon la même méthodologie, pour les scènes d'archives SPOT de 1987 et/ou 2002. Toutefois, il avait été fait état à plusieurs reprises (et en particulier lors de la mission terrain du mois d'août utilisant des données spot 4), de l'important fossé existant entre ce que l'on enregistre et détecte avec des pixels de 10 m et avec des pixels de 20 m. L'intégration de l'information qui en résultait débouche parfois sur la création d'objets intermédiaires qui ne correspondent plus à ceux de la nomenclature retenue pour la classification de l'image à 10m.

Le travail de comparaison des résultats des classifications de l'imagerie spot 2005 à 10m de résolution spatiale avec ceux obtenus avec les scènes d'archive de 1987 ou 2002 ne pouvait donc fournir les résultats attendus. Il a donc été proposé de comparer sur un secteur donné les résultats obtenus entre l'analyse de l'image de 2005 et de l'image de 2009 ou bien d'effectuer une comparaison entre les résultats de la typologie 2008 et l'analyse de l'image spot 2009 sur une zone sans nuages. Nous avons procédé successivement à ces deux opérations.

Pour la seconde partie optionnelle, il a été convenu de reconsidérer l'étendue géographique couverte et à opter pour le choix d'une zone particulière dont on savait que des changements très significatifs s'étaient manifestés à l'échelle des paysages.

PREMIERE PARTIE : APPORT DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT 5 POUR LE SUIVI DE L'EVOLUTION DES ESPACES BOISEES.

INTRODUCTION

Il ne s'agissait plus dans le cadre de cette première partie d'effectuer une analyse historique à partir des images d'archive SPOT 4 à 20m de résolution spatiale mais de tester les potentialités et l'apport des images satellitaires SPOT 5 à 10m pour le suivi de l'évolution des espaces à dominante boisée.

Comme suggéré lors des comités techniques, ce travail a tout d'abord été effectué à partir des deux images SPOT 5 les plus récentes, celle du 07 octobre 2009, seule image dont nous disposions acquise après 2008, date de l'état des lieux réalisé. Cette image, délicate à utiliser en particulier sur l'ensemble des massifs forestiers qui sont tous très nuageux, a été acquise assez tardivement en raison d'une très importante nébulosité observée lors des tentatives précédentes effectuées entre juin et septembre 2009. Elle a donc été enregistrée presque un an après l'état des lieux fourni lors de la phase 1 ce qui était par contre un avantage pour que l'on puisse observer un minimum de changements. Nous avons pu montrer également qu'elle présentait de nombreux autres avantages liés à la période d'acquisition et à la pluviométrie observée en 2009.

Nous avons dans un premier temps procédé à des essais de classification de cette image et de l'image de juin 2005 qui avait été utilisée conjointement avec les photographies aériennes et le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) pour l'établissement de la situation 2008.

Nous avons ensuite effectué une comparaison entre les résultats de la typologie 2008 et l'analyse de l'image spot 2009 sur une zone sans nuages

1. – Préliminaire : résultats obtenus par analyse comparative des images SPOT 5 du 30 juin 2005 et du 7 octobre 2009.

1.1 - Caractéristiques des images.

Juin 2005 : acquise à 9h22 locale (incidence de 5,5° et élévation solaire de 46,7°).

Octobre 2009 : acquise à 9h19 locale (incidence de 6,3° et élévation solaire de 67°).

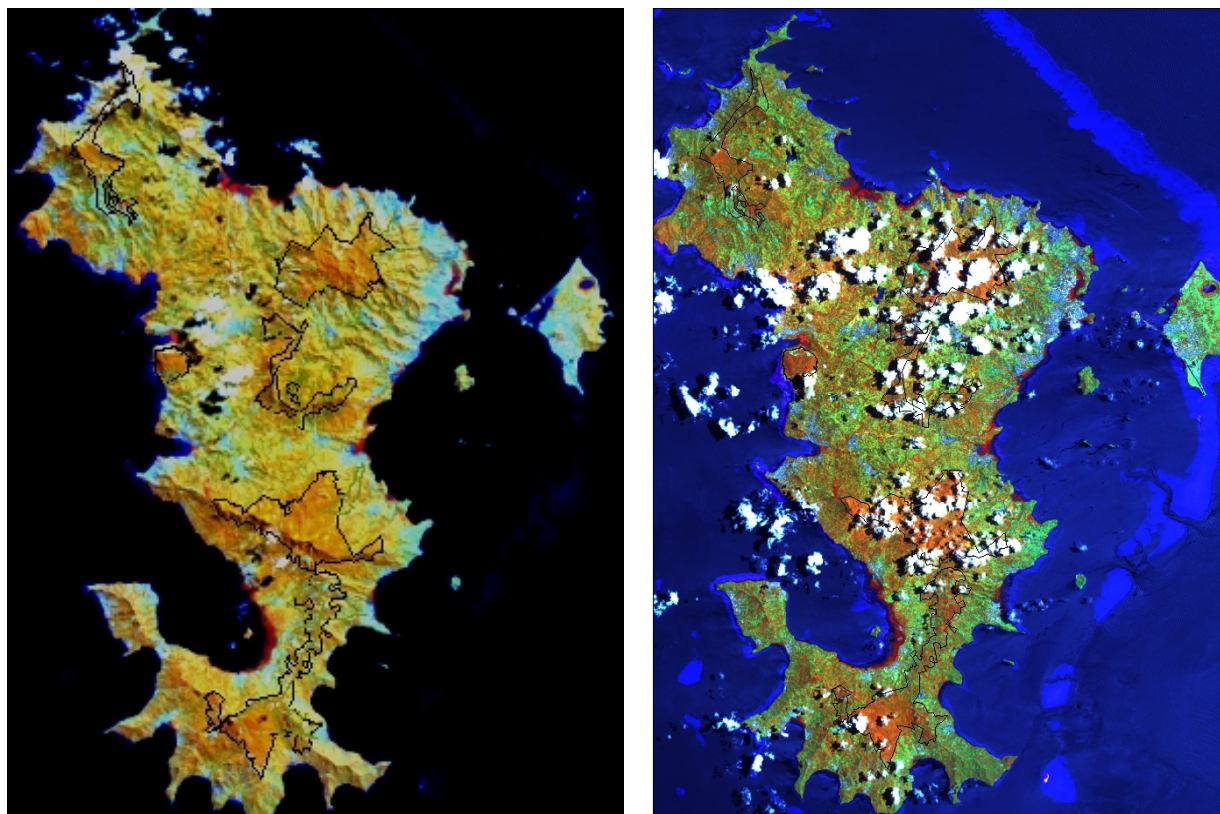


Figure 1 : images SPOT 5 du 30-06-2005 (à gauche) et du 7-10-2009 (à droite).
(Compositions colorées PIR-MIR-R en RVB)

1. 2. – Classifications non supervisées.

Il s'agit d'un regroupement automatique des pixels par classes sans intervention de l'utilisateur (excepté pour le choix du nombre de classes).

L'intérêt est de mettre en évidence sur une image donnée les principales ressemblances et dissemblances en matière de comportement radiométrique pixellaire. L'objectif est d'orienter le choix des classes potentielles à retenir pour de futures classifications dites 'supervisées' ou 'dirigées' (cf 1.3) où l'utilisateur fournit un certain nombre de références solides (échantillons) pour la définition des classes qu'il souhaite isoler sur l'ensemble de l'image ou à l'intérieur de secteurs géographiques ou d'unités paysagères issues d'une stratification préalable de l'image (exemple : réserves forestières).

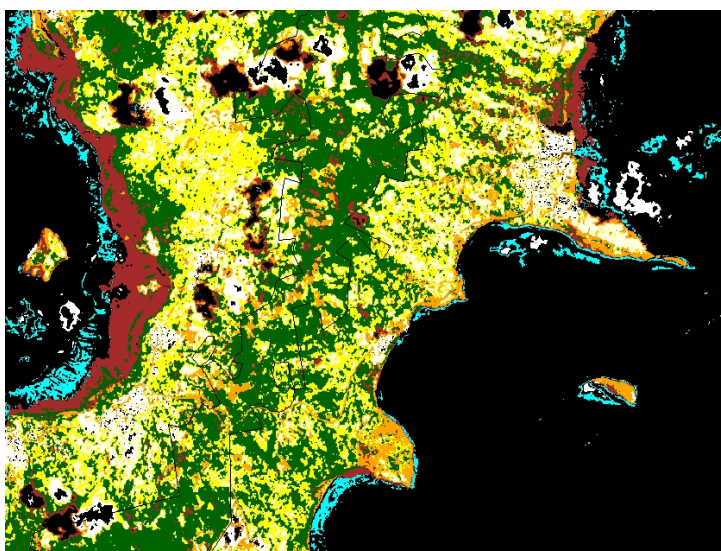
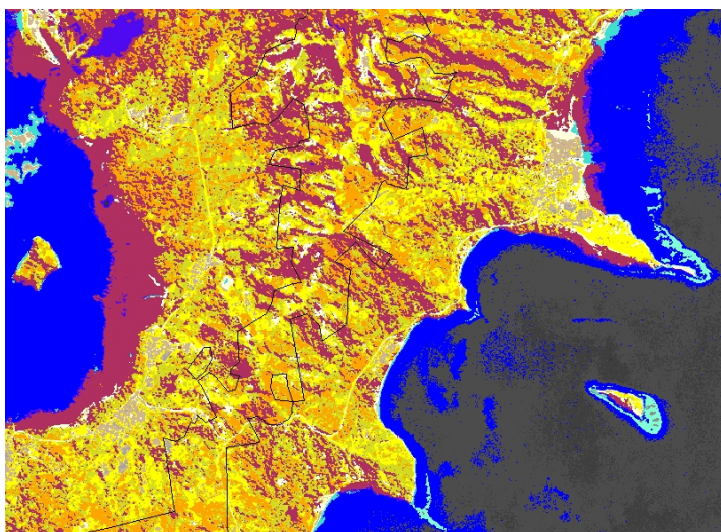


Figure 2 : Exemples de classifications non supervisées en 20 classes sur les images SPOT du 30 juin 2005 (en haut) et du 7 octobre 2009 (en bas) ; Extraits sur le secteur retenu Chirongui-Dembrélé.

1.3 – Classifications supervisées

Les essais effectués ont utilisé comme parcelles d'apprentissage les relevés effectués durant les missions terrain des mois d'août et d'octobre 2009.

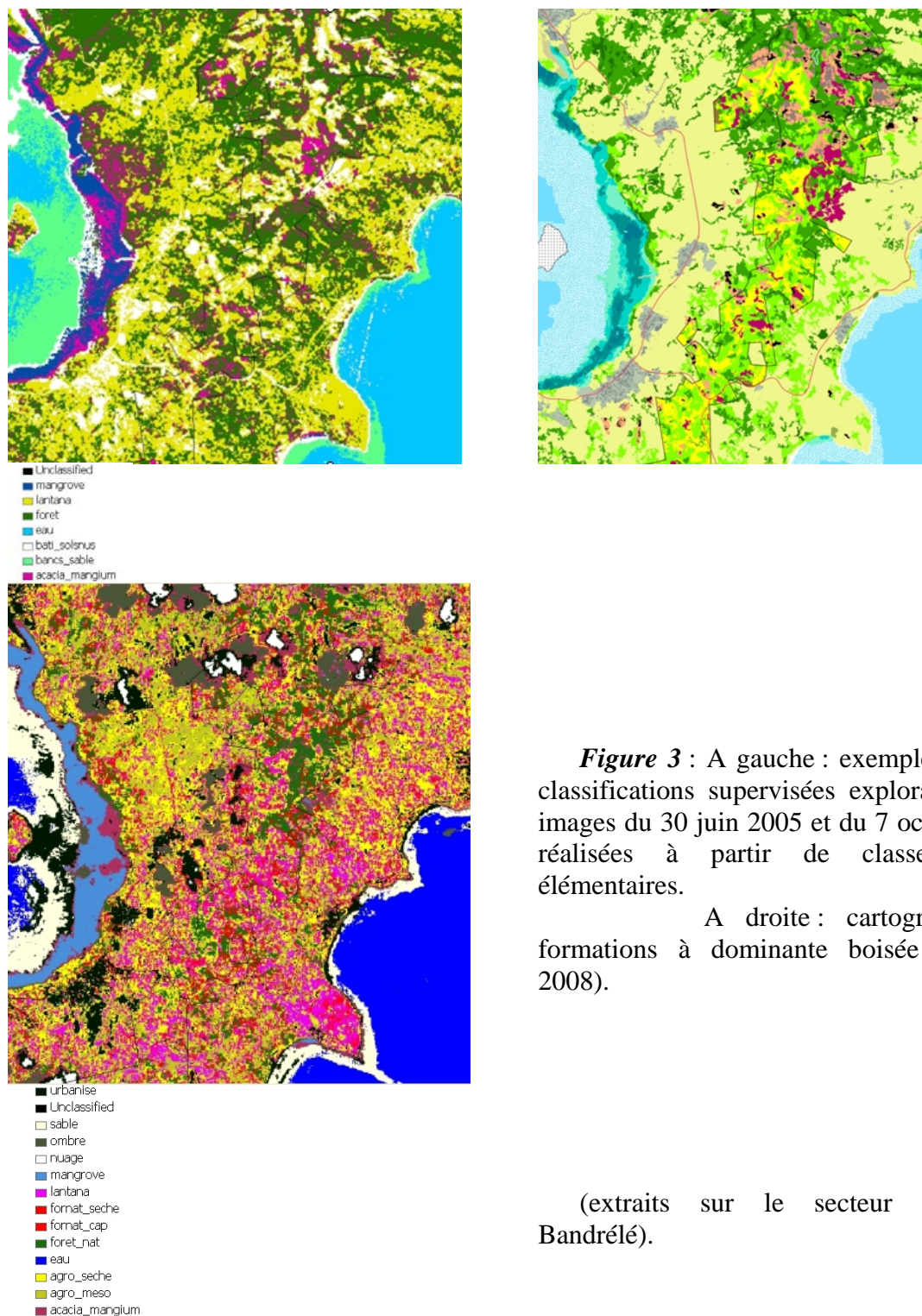


Figure 3 : A gauche : exemples de deux classifications supervisées exploratoires des images du 30 juin 2005 et du 7 octobre 2009 réalisées à partir de classes terrain élémentaires.

A droite : cartographie des formations à dominante boisée (situation 2008).

(extraits sur le secteur Chirongui-Bandrélé).

Nous avons ainsi rapidement constaté que même à partir de l'image SPOT 5 de 2005 sur laquelle le repérage visuel des peuplements *d'acacia mangium* (suffisamment développés et étendus) était aisé, les classifications radiométriques n'étaient pas satisfaisantes (erreurs importantes d'omission et de commission).

Ces confusions radiométriques sont dues à des comportements voisins dans le domaine du Proche Infra-Rouge (saturation du LAI) mais également à des phénomènes d'ombrages ou de réflexion spéculaire sur certains versants ainsi qu'aux ombres portées de la strate dominante sur son voisinage immédiat.

La résolution spatiale de 10m est également à l'origine d'une intégration de l'information radiométrique qui nuit à la discrimination des objets de petite taille.

1. 4 – Analyse visuelle des deux images.

Avant d'aller plus loin en matière de traitement numérique, nous avons cherché à nous assurer qu'une reconnaissance visuelle d'autres postes de la nomenclature était possible. Cette analyse de l'évolution par comparaison de deux images s'est heurtée à des différences dans les paramètres de la géométrie visée-éclairage et dans les stades phénologiques observés.

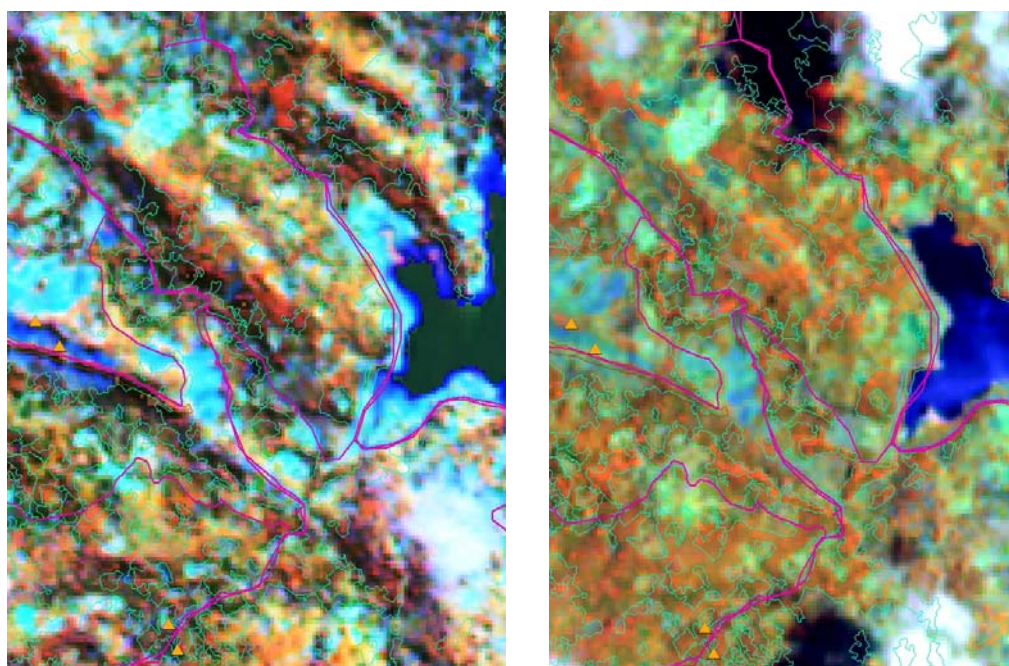


Figure 4 : Retenue collinaire de Dzoumonyé : compositions colorées PIR-MIR-R en RVB des images SPOT 5 du 30-06-2005 (à gauche) et du 7 octobre 2009 (à droite) montrant l'impact de la différence d'élévation solaire sur les effets d'ombrage ainsi que la perte d'information qui en résulte pour les versants à l'ombre.

Ajoutons également que l'analyse repose dans ce cas uniquement sur la radiométrie et la texture de l'image, sans aucune information sur la hauteur des formations comme cela était le cas lors de la phase 1.

Il en résulte même visuellement une très grande incertitude sur la nature et l'état des objets au sol, ce qui débouche sur un questionnement sans fin sur la véracité des hypothèses avancées quand au comportement radiométrique de ces mêmes objets.

Ceci est exacerbé par le fait que la résolution de 10m x 10m ne permet pas d'extrapoler aisément aux images satellites ce que l'on observe sur les photos aériennes et sur le MNH à 1m de résolution spatiale.

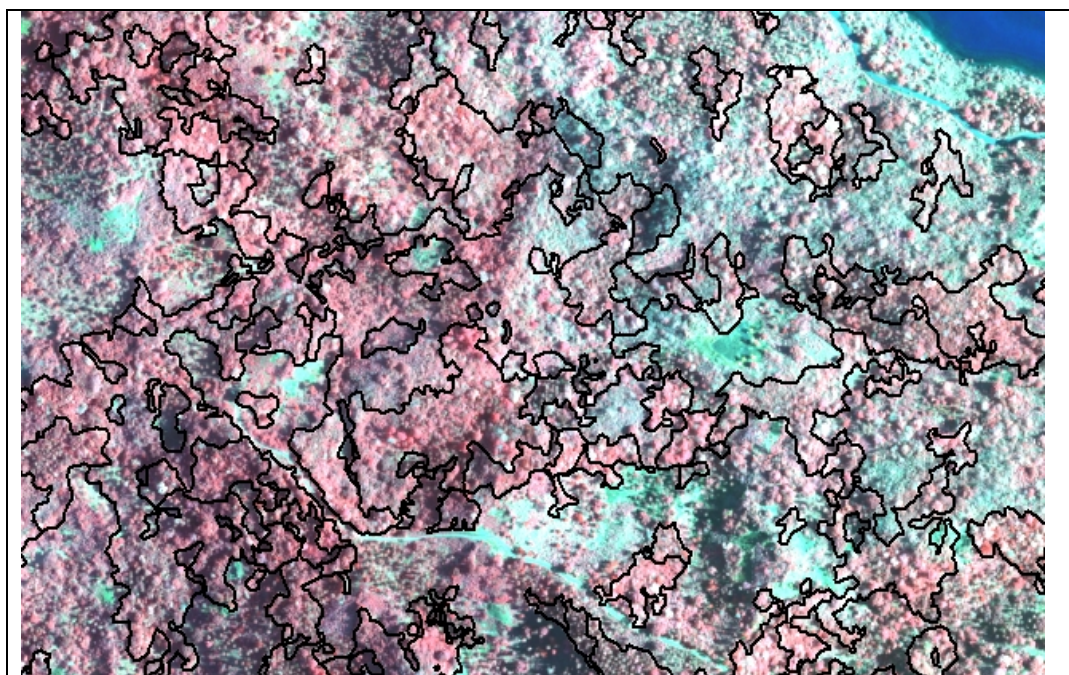


Figure 5 : Limites des formations boisées extraites de la typologie 2008 et superposées à l'orthophotographie Infra-Rouge Couleurs (IRC) à 1m de résolution de novembre 2008 (extrait sur zone nord de Dzoumonyé). On constate que même avec une résolution 100 fois supérieure à celle des images SPOT 5 à 10m, les confusions radiométriques auraient été nombreuses si l'on n'avait pas disposé d'une information sur les hauteurs : de nombreuses formations auraient été incluses dans les formations boisées.

En résumé, il est donc indispensable de comparer des enregistrements effectués à la même période.

Toutefois, ceci ne pourra résoudre le problème des différences de pluviométrie observables fréquemment d'une année sur l'autre. Il faut donc de préférence des enregistrements à une période où l'on est certain que l'influence des conditions pluviométriques récentes sera minimisée (septembre- début octobre).

2 – Résultats obtenus par analyse comparative des images SPOT 5 du 15 octobre 2003 et du 7 octobre 2009.

Ces deux images présentent en effet la particularité tout à fait exceptionnelle d'avoir été non seulement acquises à la même période (début octobre) d'ailleurs idéale comme on l'a vu ci-dessus mais aussi dans un contexte de pluviométrie récente identique. L'aspect tout à fait similaire présenté aux deux dates sur la quasi-totalité de l'île en utilisant les mêmes compositions colorées (voir figure 6) ne permet guère d'en douter.



Figure 6 : compositions colorées PIR-MIR- R en RVB faisant apparaître la végétation active en orangé ou en rouge (mangrove, *acacia mangium*). La végétation sèche ou les sols dénudés (non rouges) apparaissent en vert clair. (région de Mzouazia)



Les conditions de visée et d'éclairement sont également pratiquement identiques (angles d'incidence de $5,6^\circ$ (2003) et de $6,3^\circ$ en 2009, élévation solaire de $69,75^\circ$ pour l'image de 2003 et de 67° pour l'image de 2009). On notera par contre que contrairement à l'image de 2009, celle de 2003 (en haut) a été acquise à marée haute.

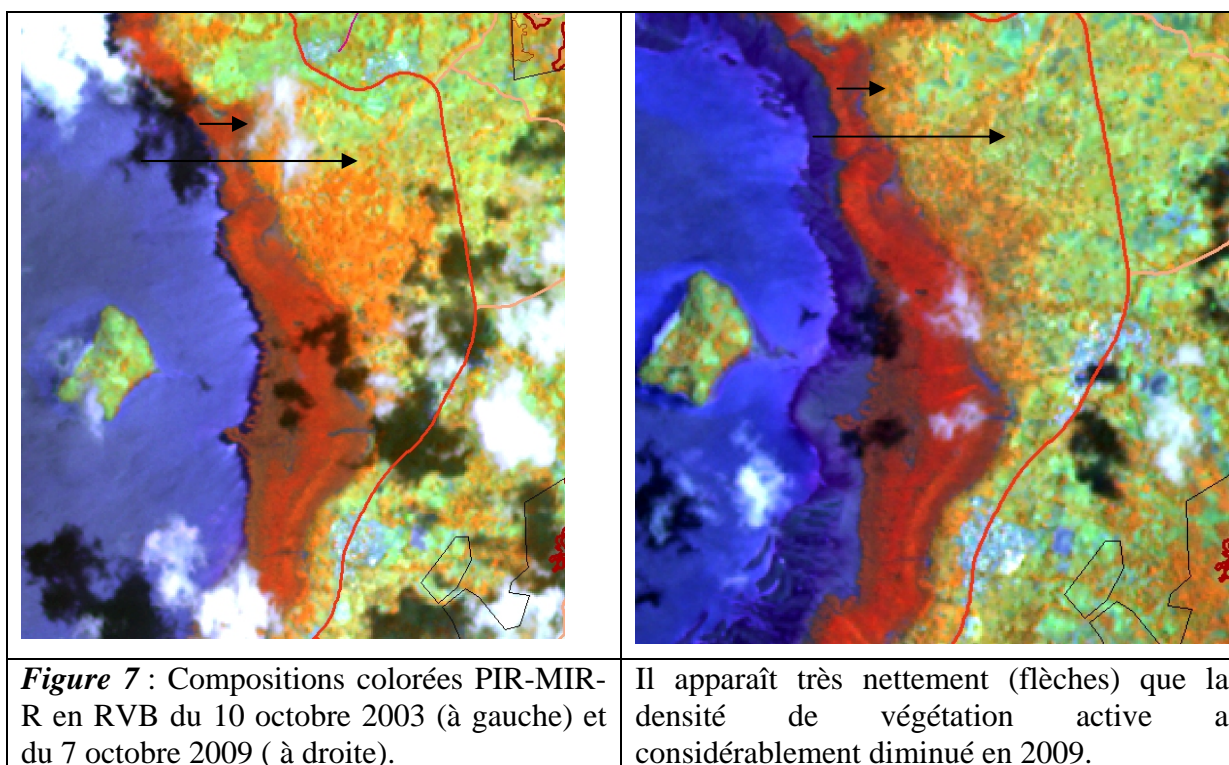
2.1 – Changements intervenus dans le domaine du MIR (Moyen Infra-Rouge).

A ce stade, nous avons entrepris de mettre en évidence les secteurs présentant un changement significatif dans le seul canal MIR, canal sensible en particulier à la teneur en eau du couvert végétal mais aussi au LAI (relation non linéaire).

2.1.1 - Analyse visuelle

Un premier travail indispensable avant d'aller plus loin consiste à procéder sur certains secteurs connus à l'analyse visuelle de ces changements afin d'en appréhender au mieux les causes et la réalité.

L'exemple présenté ici se situe immédiatement à l'est de la mangrove de Miréréni.



La période étant exactement la même, la différence observée ne peut pas être due à une différence de défoliation de certaines espèces arborées d'arrière-mangrove (*Erythrina fusca*) et l'on pourrait donc avancer l'hypothèse d'une diminution de leur densité. Toutefois, bien que ces érythrines soient réellement menacées, il est nécessaire avant de conclure de s'assurer qu'il n'y ait pas également un impact d'une modification récente du type d'agriculture pratiqué en contact direct avec la couverture arborée. Il est également fort probable que cette différence traduise une importante dégradation du sous-bois de ces érythrinaies.

2.1.2 - Analyse numérique.

Le secteur test retenu pour procéder à une évaluation quantitative de ces changements d'occupation du sol se situe à l'est de la retenue de Dzoumonyé. Il a été choisi suite au souhait du SRF de travailler dans la région située entre les deux réserves des crêtes du Nord et de Majimbini. Il est malheureusement de petite taille en raison de la nébulosité combinée des images de 2003 et 2009 qui ne nous laissait pratiquement que cette possibilité pour travailler sur une zone non nuageuse.

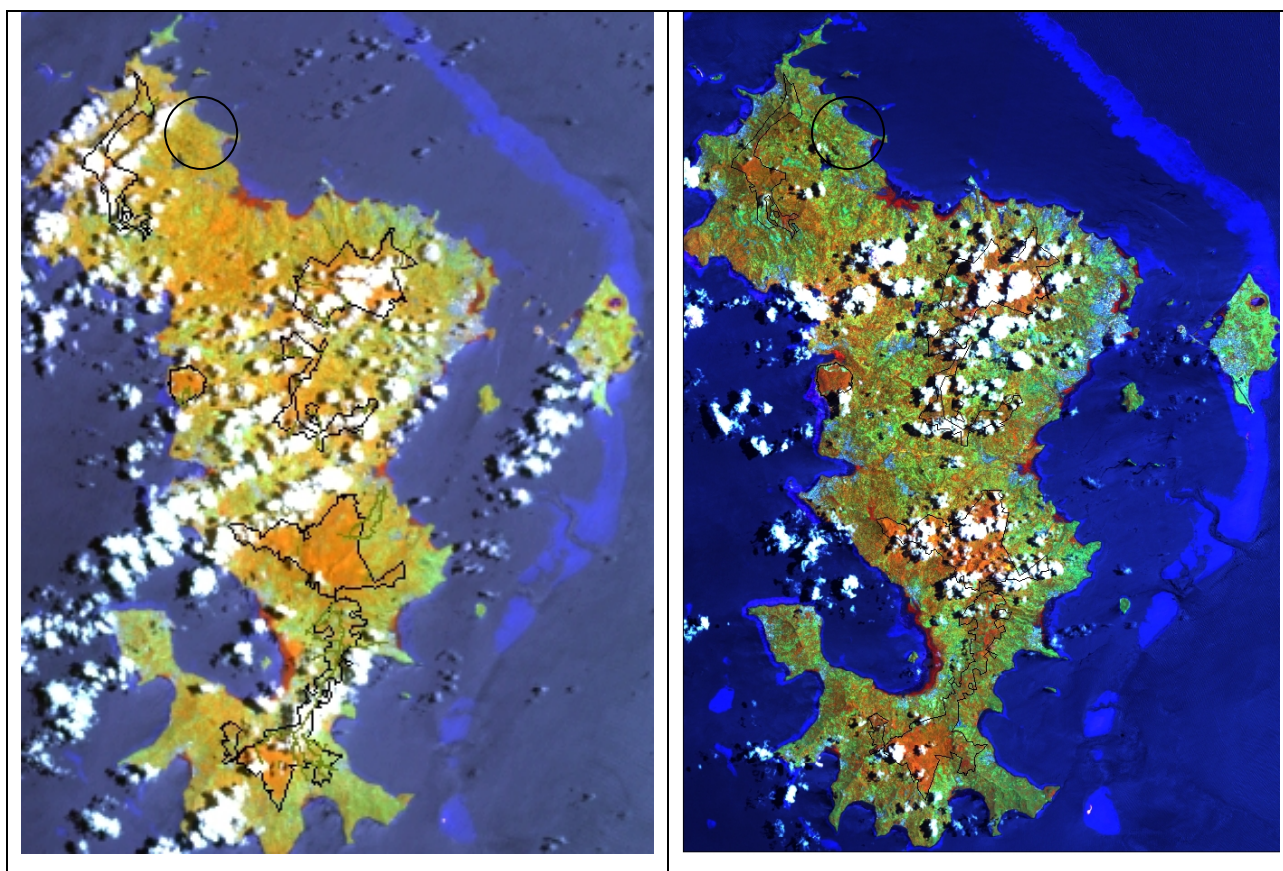


Figure 8 : Images SPOT 5 de 2003 et 2009 (PIR-MIR-R en RVB)

Nous avons retenu les pixels pour lesquels le calcul donnait une augmentation de 15% des valeurs entre les comptes numériques des images de 2003 et de 2009. Ce seuil a été choisi après différents essais avec des valeurs comprises entre 10% et 20%. Il est bien évident également que ce seuil doit être ajusté pour tenir compte des différentes conditions d'humidité rencontrées (forêt humide, forêt sèche).

Ce premier calcul permet de mettre en évidence la plupart des parcelles qui présentaient en 2003 un couvert continu de végétation active et qui en 2009 sont cultivées ou dénudées.

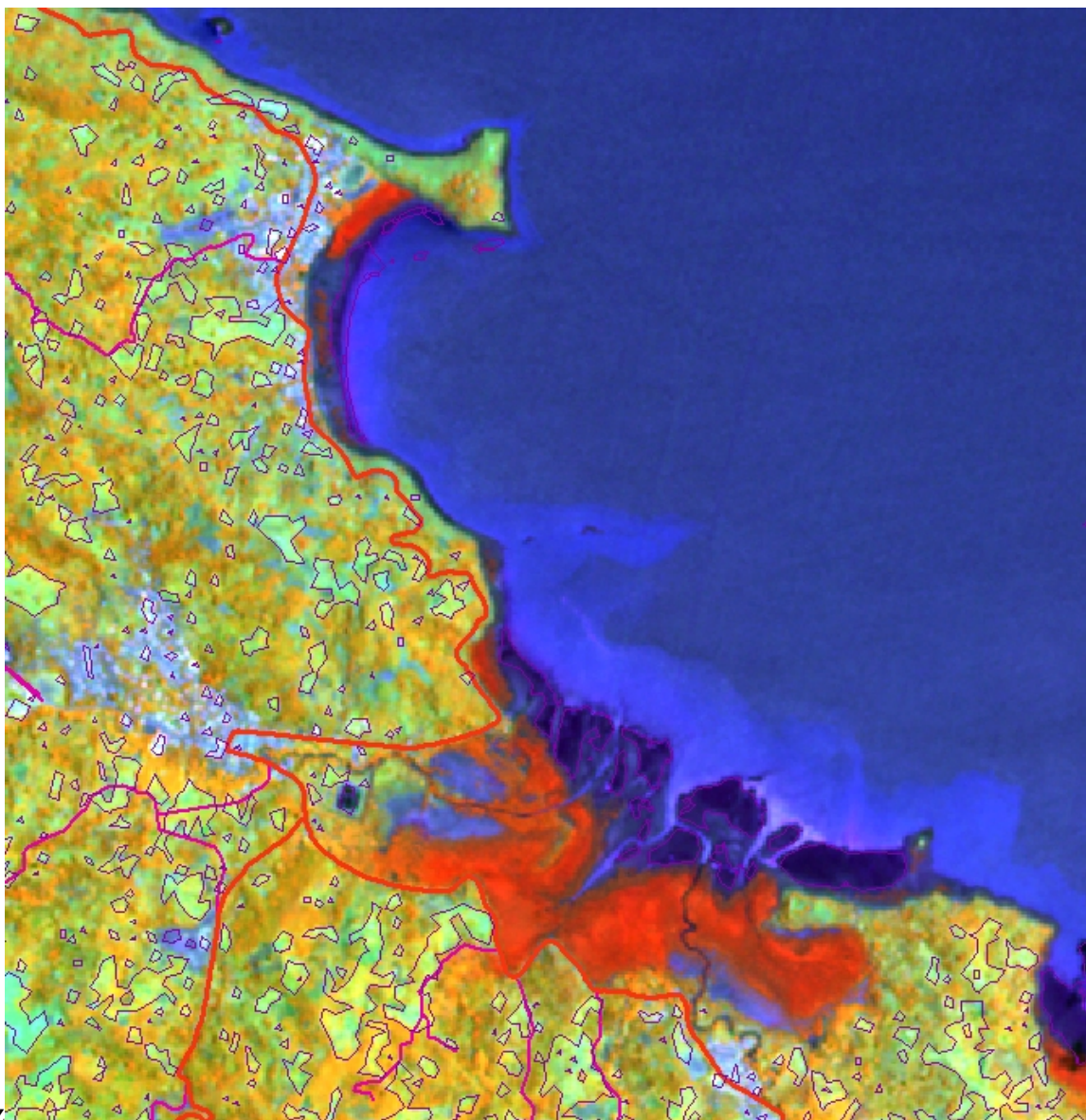


Figure 9 : Délimitation (en mauve) sur fond d'image 2009 des ensembles de pixels présentant une augmentation de la valeur enregistrée dans le canal MIR entre 2003 et 2009. (secteur de Dzoumonyé- Bandraboua).

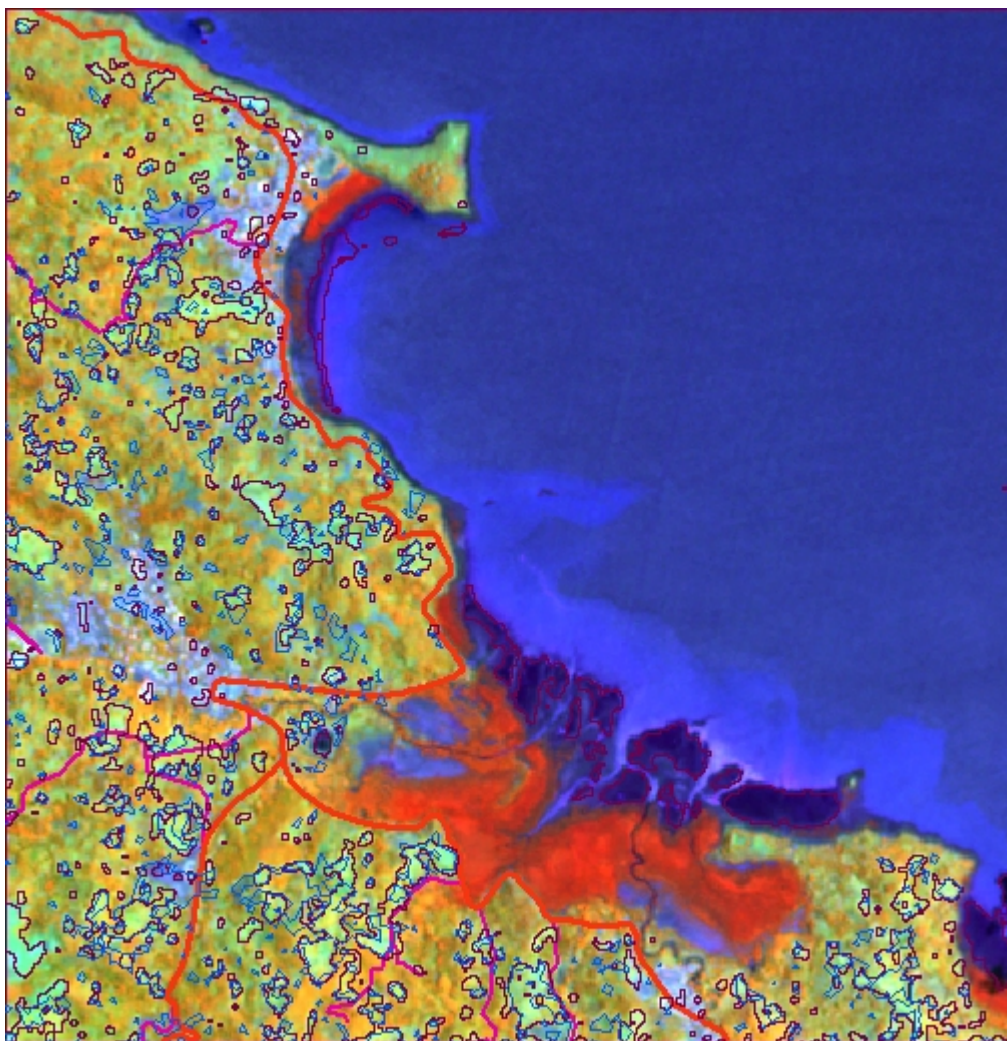


Figure 10 : Délimitation complémentaire (en bleu) des ensembles de pixels présentant une diminution notable d'index de végétation entre 2003 et 2009.

2.2 - Changements intervenus dans l'index de végétation. (PIR-R)

Le contrôle a montré que certaines parcelles de ce type sont en réalité moins réfléchissantes dans le MIR en 2009 bien que complètement dénudées et d'aspect rougeâtre en 2009. Il s'agit le plus souvent de sols présentant au moment de l'acquisition une humidité de surface plus importante qu'en 2003 (exemple : sol de chantier ou récemment travaillé). Il importait donc de les isoler à leur tour, ce qui a été effectué en calculant la différence des index de végétation 2003 et 2009. Ces nouveaux ensembles de pixels ne sont évidemment pas disjoints des précédents (cf figure 10) et il a été nécessaire de procéder à l'union des deux ensembles pour évaluer le total des surfaces concernées par le défrichement entre 2003 et 2009.

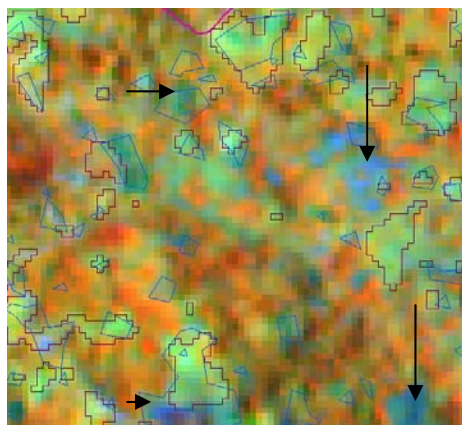
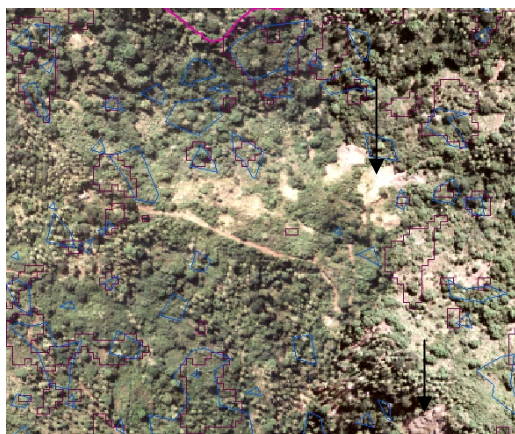


Figure 11 : Apport de la différence des index de végétation 2003 et 2009 : Zoom sur un secteur de l'image Spot 5 de 2009 (PIR-MIR-R en RVB) montrant en bleu des parcelles de sol nu en 2009 qui ne l'étaient pas en 2003 (flèches horizontales) et d'autres parcelles (flèches verticales) déjà défrichées en 2003 et donc non prises en compte .



Superposition sur fond d'orthophotographie IGN de juin 2003 des parcelles présentant une baisse notable de l'index de végétation entre 2003 et 2009.

Le calcul montre que pour une surface terrestre de 858 ha on trouve 126, 2 ha de parcelles du premier type (diminution de la teneur en eau) et 93,7 ha de parcelles du second type (diminution index de végétation) dont 56,45 ha en commun avec la première catégorie. On comptabilise donc 163,4 ha de défriches entre 2003 et 2009, **soit un pourcentage de la surface terrestre concernée d'environ 18%.**

3. – Analyse de l'évolution des espaces boisés par analyse comparative de l'imagerie SPOT 5 et de la cartographie de la situation 2008.

Bien que moins d'un an se soit écoulé entre la cartographie fournie (situation en 2008) et l'acquisition de l'image SPOT 2009, nous avons procédé à cette comparaison afin de donner un exemple de ce qui pourrait être régulièrement effectué à partir de futures acquisitions.

Afin d'analyser l'évolution des formations boisées dans leur ensemble, nous avons procédé comme suit :

- Regroupement en une seule classe des 4 classes de formations boisées (hors plantations et hors mangroves) présentes dans la typologie fournie (situation 2008) et création d'un plan vecteur regroupant les contours de l'ensemble des objets ainsi sélectionnés.
- Utilisation de ce plan vecteur comme emporte-pièce pour découper l'image SPOT 5 de 2009.
- Classification de la sous-image obtenue en 15 classes puis regroupement des classes en deux catégories « boisé » et « non boisé ».
- En raison de la forte nébulosité de l'image, nous avons été amenés à délimiter 7 secteurs correspondant à différentes situations agroécologiques et si possible dépourvus de nuages (Tsiraka Apondra, Dzoumonyé nord, Dzoumonyé sud, Combani, Ouangani Hajangoua, presqu'île de Bouéni).

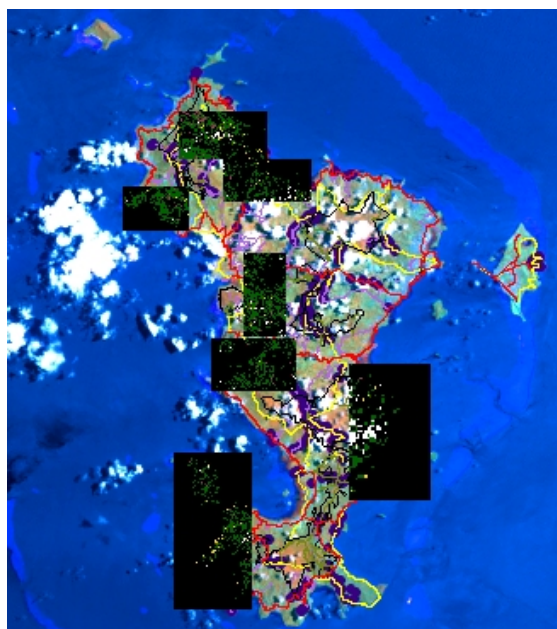


Figure 12 : Localisation des sites retenus (sur fond d'image SPOT 5 de 2009).

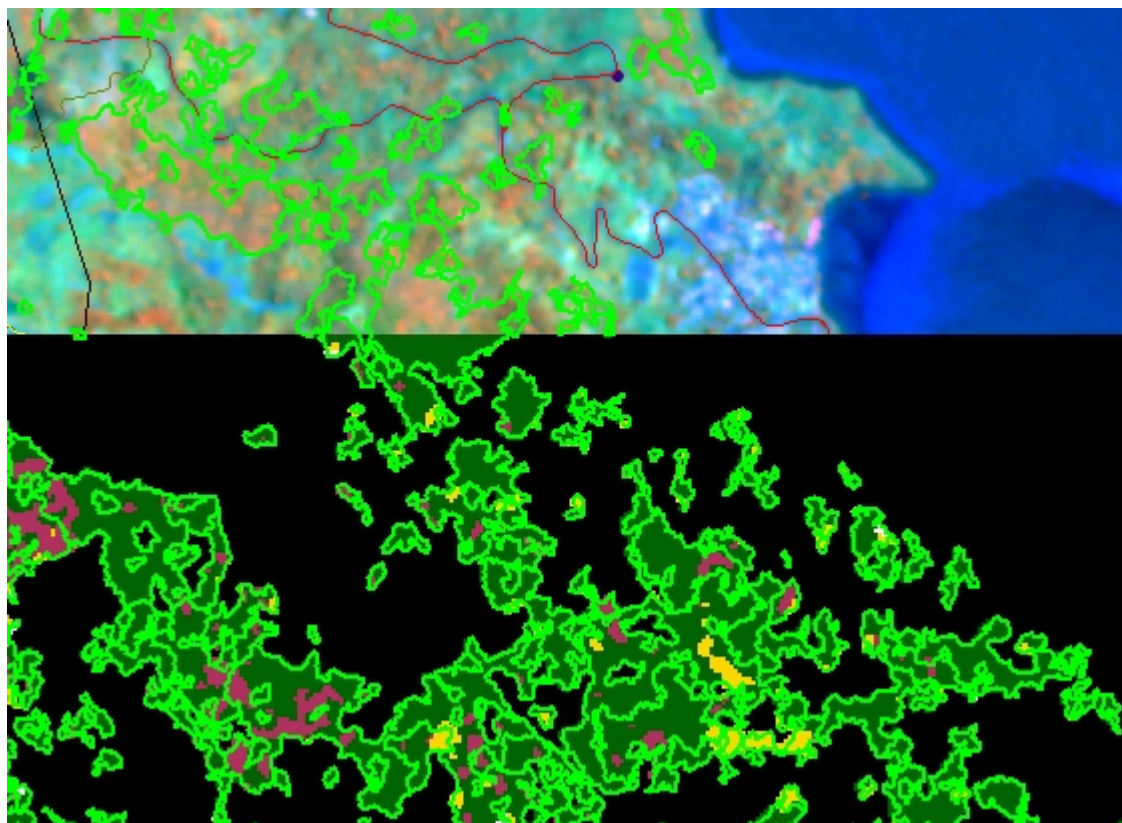


Figure 13 : Extrait de résultat de classification (en bas) de l'image SPOT du 7 octobre 2009 (en haut) à la limite nord du site Bandraboua.

En jaune : les surfaces boisées de la typologie 2008 (contours verts) ne présentant plus les caractéristiques de la végétation active.

En vert foncé les surfaces boisées 2008 toujours en végétation active.

En rouge, surfaces boisées 2008 toujours actives mais affectées par une ombre portée.

Les résultats obtenus sont différents selon les sites mais doivent surtout être interprétés avec précaution en raison de différents facteurs d'incertitude :

- La différence de résolution spatiale entre les données utilisées est très importante. En effet la cartographie a été réalisée à partir de données à 1m de résolution alors que l'image spot 5 utilisée ne présente une résolution spatiale que de 10m. On dispose donc de 100 fois moins d'information avec une telle image. Il en résulte la présence extrêmement gênante de pixels de bordure intégrant une information au sol en partie extérieure aux polygones extraits de la cartographie 2008 et qui conduisent à une surestimation des surfaces déboisées.

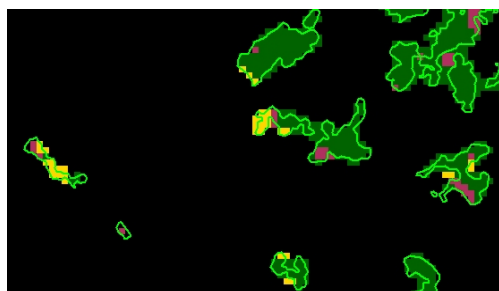


Figure 14 : les pixels jaunes (absence de végétation active) sont souvent des pixels mixtes. C'est le cas en bordure de parcelles et en particulier des cordons littoraux

- Les difficultés sont encore plus grandes en zone sèche en raison de la nature des boisements à l'intérieur desquels on note la présence de fourrés secs à *lantana* dont la radiométrie est intégrée dans la réponse des pixels de l'image. Il arrive donc que l'on ait l'illusion d'une disparition de certains boisements qui sont pourtant bien présents et qui avaient été repérés comme tels grâce à la haute résolution du MNH (1m). Ce phénomène est encore accentué par la défoliation en octobre de certaines espèces arborées qui avaient été correctement repérées comme telles à partir du MNH.

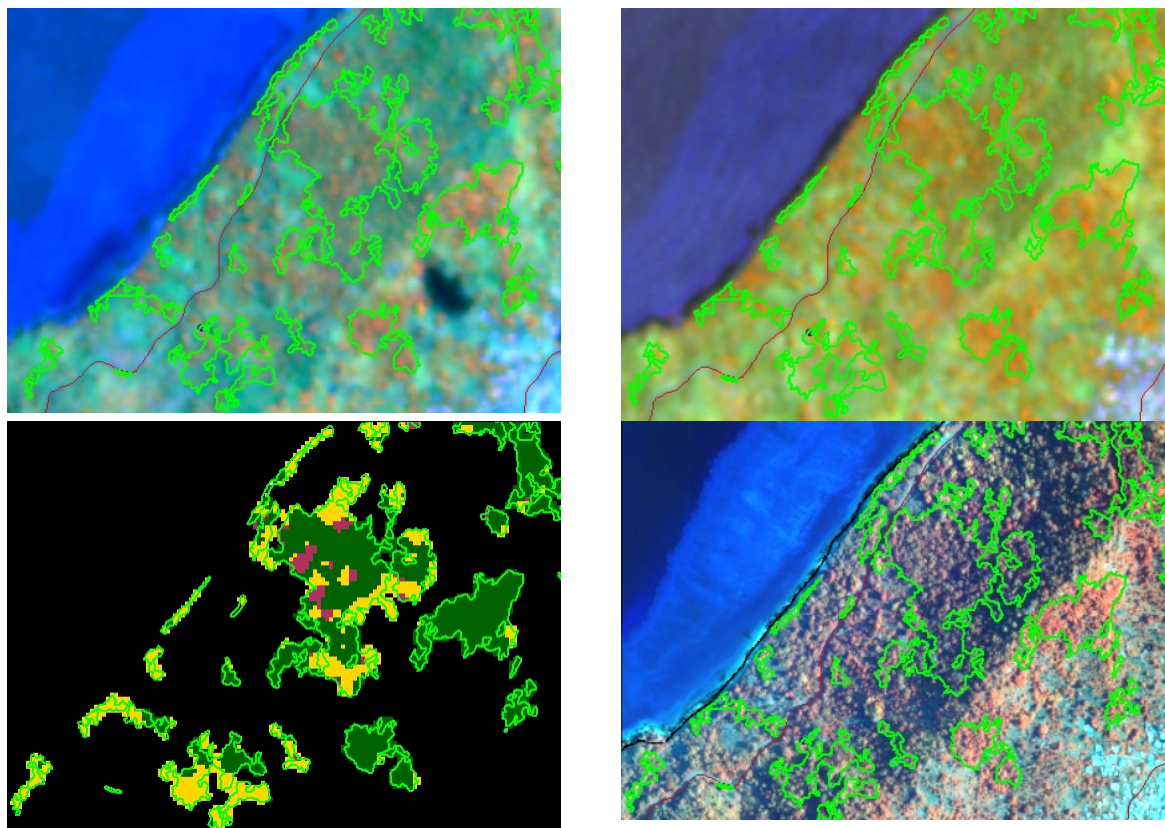


Figure 15 : Zone sèche située entre N'Gouja et Mbouéanatsa.

On note l'importance des surfaces classées en 'non-boisé' sur l'image d'octobre 2009 mais qui ne peuvent pas être comptabilisées comme telles (espèces défoliées, impact des fourrés). Cette hypothèse est confirmée en partie par l'image de 2003 prise à la même période.

On vérifie ici une fois de plus l'intérêt des acquisitions d'image au début du mois d'octobre pour réduire l'impact de l'ombre ainsi que la gêne occasionnée par celle-ci sur l'orthophotographie de novembre 2008.

- la présence de nuages a été réduite au maximum lors du choix des sites mais ceci génère une incertitude dont nous avons tenu compte. Pour cette raison, il nous est impossible de donner un résultat fiable sur l'ensemble de l'île en raison de l'importance de la surface couverte par les nuages et par leur ombre et donc de l'absence totale d'information sur d'éventuels changements intervenus.

Les pixels isolés ont été éliminés par lissage et tous les calculs ont été effectués hors réserve.

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Site retenu	Perte en surface boisée
Tsiraka Apondra- Mliha	1,7 % à 2%
Dzoumonyé-Bandraboua	3,7 % à 4,4%
Dzoumonyé-sud	3,8% à 4,5%
Combani	1,5 % à 2%
Ouangani.	1,6% à 2%.
Hajangoua	5 % à 7%
Presqu'île de Boueni	Trop grande incertitude en zone sèche

Le pourcentage élevé observé sur Hajangoua est en partie lié au fait que la zone totalise une surface en espaces boisés 2 ou 3 fois plus faible que sur les autres secteurs.

4. – Bilan .

Même si les résultats obtenus en matière d'atteinte aux surfaces boisées entre 2008 et 2009 sont cohérents sur la zone de Dzoumonyé avec la valeur de 18% estimée sur 6 ans entre 2003 et 2008, ces résultats ne fournissent qu'un ordre de grandeur.

Ce n'est en effet que par un faisceau de méthodes utilisant des données de sources différentes qu'une estimation solide pourra être effectuée.

L'analyse des données satellitaires 2009 à 10 m de résolution présentée ici constitue une de ces méthodes d'évaluation. Toutefois, ce type d'évaluation ne pourra être véritablement fiable que si le niveau de précision des données est comparable avec celui de l'état des lieux. Elle ne pourra donc être qu'améliorée par l'utilisation de données satellitaires à Très Haute Résolution spatiale (THR).

5. - Propositions

La première procédure mise en œuvre afin de tester les potentialités offertes par la comparaison d'images SPOT 5 à 10m pour le suivi des formations boisées a montré qu'il ne pouvait y avoir d'étude dynamique correcte de l'évolution que si l'on comparait ce qui était comparable c'est à dire si l'on utilisait des images acquises dans des situations pratiquement identiques : même période de l'année, mêmes conditions d'éclairement et même contexte pluviométrique.

Si ces conditions ne sont pas réunies, il ne faudra pas essayer d'étudier la dynamique d'une quelconque formation, mais au contraire mettre à profit les différences observées pour tenter d'isoler un phénomène donné ou un poste particulier d'occupation du sol (exemple : espèces caducifoliées, fourrés à lantana..).

La seconde procédure visait à mettre à jour l'état des lieux 2008 à partir de données Spot 5 2009. Toutefois il faut bien noter qu'un facteur 100 sépare la résolution spatiale des données SPOT 5 à 10m de celles utilisées pour construire la typologie des formations à dominante boisée. De ce fait, en dehors du fait que l'on ne dispose sur ces images d'aucune donnée sur les hauteurs, on travaille à une échelle et dans des conditions très éloignées qui obligent à reconsidérer souvent totalement la définition des postes de la nomenclature.

En conséquence, nous préconisons pour les futurs suivis d'utiliser des données THR. Ce sera par exemple un atout important pour la détection des jeunes peuplements (par exemple *acacia mangium*) qui ne peuvent être détectés sur les images à 10m que s'ils ont atteint un stade de développement suffisant.

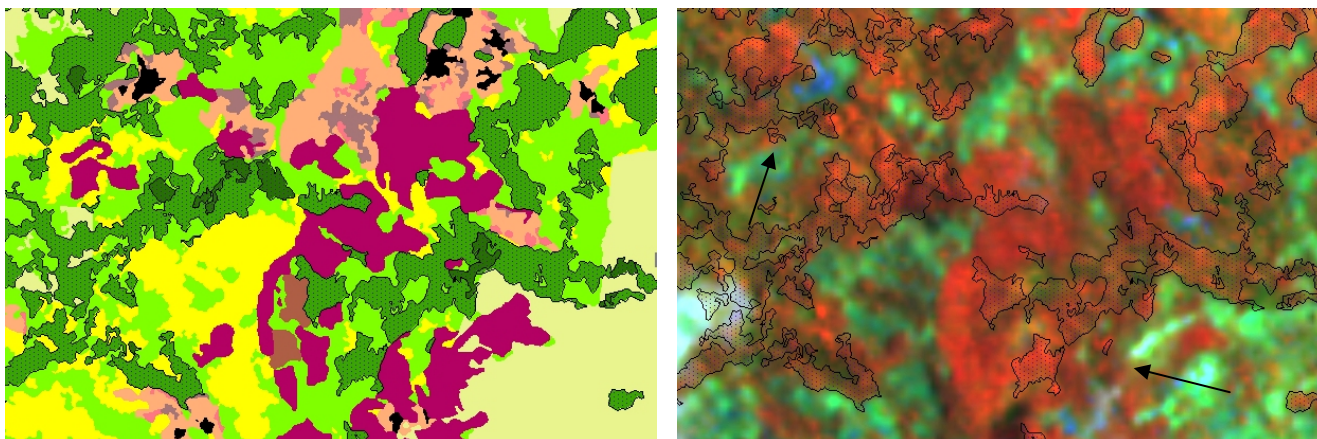


Figure 16 : Les *acacia mangium* cartographiés (en rouge lie de vin) à l'aide des orthophotos de 2008 ne sont pas tous bien discriminables sur l'image SPOT d'octobre 2009 à 10m de résolution.

En dehors du satellite SPOT à 2,5m de résolution, les autres satellites sont les suivants :

Les satellites Très Haute Résolution (THR)

- **Déjà disponibles :**
 - Ikonos : résolution de 1 m en panchromatique et 4 m en multispectral (USA)
 - GeoEye 1 : résolution de 41 cm en panchromatique et 1,6 m en multispectral (USA)
 - Quick Bird : résolution de 70 cm en panchromatique et 2,5 m en multispectral (USA)
 - WorldView 1 : résolution de 50 cm en panchromatique, pas de multispectral (USA)
 - WorldView 2 : résolution de 50 cm en panchromatique et 2 m en multispectral (USA)

➔ 8 bandes disponibles : bleu, vert rouge, proche infra rouge + red edge, « coastal band », jaune, proche infra rouge 2

Notons également le lancement prochain de Pléiades, constellation constituée des satellites français Pléiades-1 (lancement fin 2010) et Pléiades-2 (2011) dont la résolution sera de 70 cm en panchromatique et 2 m en multispectral (Bleu, vert, rouge PIR) ; La fauchée sera de 20 km x 20 km.

On voit apparaître ici un inconvénient majeur : aucun de ces satellites ne possède de canal MIR. (Moyen Infra-Rouge). Or, nous avons constaté à de multiples reprises que dans les conditions observées à Mayotte, le canal MIR était d'un intérêt indiscutable pour la discrimination des grandes formations boisées et des plantations en raison de sa sensibilité à la teneur en eau du couvert.

En ce sens, seules les données du satellite SPOT 5 à 2,5m sont actuellement utilisables mais la poursuite du programme SPOT (SPOT 6 et SPOT 7) permettra d'étendre le service jusqu'à au moins 2022 avec un canal MIR.

DEUXIEME PARTIE : COMPARAISON ENTRE LA CARTOGRAPHIE OBTENUE (SITUATION 2008) ET L'ANALYSE DES SCANS DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES D'ARCHIVES DE L'IGN (1950)

INTRODUCTION

Le concept même de gestion forestière, y compris les actions de conservation, qui conduit à déterminer au sein d'un territoire donné l'affectation d'une ressource, se heurte au caractère non permanent des facteurs bio-physiques ou socio-économiques qui prédisposent à la détermination de chaque mode d'occupation des sols.

L'analyse historique des changements de la composition paysagère se révèle des lors particulièrement intéressante pour prendre la mesure des changements représentés par la mise en jeu permanente, parfois de nature antagoniste, de ces mêmes facteurs. Une telle analyse est généralement basée sur une approche comparative de type diachronique valorisant des supports photographiques anciens. Elle fournit un cadre objectif permettant d'analyser les tendances en jeu, qui combinent dans l'espace et dans le temps des processus et de reprise de chaque type de recouvrement par la végétation.

A Mayotte, ce type d'approche, au demeurant coûteux en temps, est resté semble-t-il peu utilisé. Il offre l'avantage d'être en mesure de légitimer ou d'infirmer certaines idées reçues selon lesquelles la situation boisée mahoraise résiste, par son caractère agroforestier dominant, à l'expansion démographique et l'évolution des modes de mise en valeur des sols. Certes, une progression assez rapide des surfaces boisées a été souvent enregistrée dans les milieux continentaux mais également dans des territoires insulaires. De tels fronts de recolonisation forestière ont été par exemple quantifiés en Amérique du Sud et en Afrique (Guariguata et al., 1997 ; Aide et al., 2000 ; Ruiz et al., 2005). La vitesse du front d'avancement d'une surface boisée sur des savanes ou des terrains agricoles abandonnés et non parcourus par le feu est de l'ordre de un à quelques mètres par an (Bocquet et al., 2007).

Le rôle des processus de propagation végétative (drageonnage essentiellement, marcottage plus accessoirement) d'une part, et des processus de dispersion des semences par l'assistance de vertébrés disperseurs dans les dynamiques de reprise forestière d'autre part, est aujourd'hui bien renseigné (Holl, 1998 ; Justiniano & Frederiksen, 2000 ; Vieira & Scariot, 2006). Dans le contexte mahorais, particulièrement pourvu en vertébrés disperseurs (oiseaux frugivores, roussettes, lémuriens) en dépit de son caractère insulaire et de l'ancienneté du peuplement humain, l'on peut donc s'attendre à ce que la vitesse d'avancement d'un front forestier soit potentiellement élevée. Nous n'avons pu évaluer une telle vitesse d'avancée dans le cadre de cette étude, qui nécessiterait de disposer de jeux de photographies distants entre eux d'un pas de temps beaucoup plus court (de l'ordre d'une décennie) afin d'éliminer d'éventuelles phases de reculs qui demeurent inaperçues si l'on se base sur un pas de temps aussi élevé que celui que nous avons utilisé (presque 60 ans).

De tels processus naturels interviennent à l'évidence dans des espaces de plus en plus contraints par l'occupation humaine, elle-même assujettie par des processus de régulation foncière et économique dont les logiques peuvent se confronter de manière conflictuelle. La

superposition du droit coutumier musulman et du code foncier relevant du droit commun national vient elle-même entailler la permanence et la légitimité des contours des réserves forestières délimitées dans les années 1940 et dès lors devenues l'objet d'un bras de fer permanent entre les citoyens et les services gestionnaires (Hassani, 2009).

Au regard d'un tel contexte au sein duquel les spécificités mahoraise ne manquent pas (mutation socio-démographique profonde, singularité de la forêt mahoraise par son caractère hautement résilient), cette seconde partie de ce rapport 4 a pour objet :

- (i) de préciser, dans une zone échantillon donnée, les changements opérés dans la distribution des surfaces boisées à un peu plus d'un demi-siècle d'intervalle,
- (ii) de clarifier les mécanismes bio-physiques et socio-économiques qui ont pu intervenir pour sous-tendre de telles modifications.

1. – Méthodes

1. 1. – Zone d'étude

La zone d'étude retenue est un polygone qui relève, au nord de Mayotte, des cantons de M'Tsamboro, Acoua et M'Tsangamouji à l'ouest, et Bandraboua à l'est (figure ci-dessous)). Elle s'insère dans le quart de Grande Terre, où l'évolution démographique récente s'avère des plus exacerbées (PADD, 2004). La zone couvre 4543 ha, soit 12,1 % du territoire, et intègre une grande partie de la Réserve forestière des crêtes du Nord. Cette dernière, qui s'étend sur 590 ha et présente des pentes pouvant dépasser 40 %, représente 10,6 % de l'ensemble des réserves forestières de l'île (5570 ha, soit 14,8 % des surfaces terrestres).

La zone retenue est donc de taille suffisante pour rendre compte de situations et de dynamiques opérant à l'échelle du territoire. Elle représente en outre une situation géographique pour laquelle les changements des couvertures boisées semblent d'être manifestées de manière exacerbée.

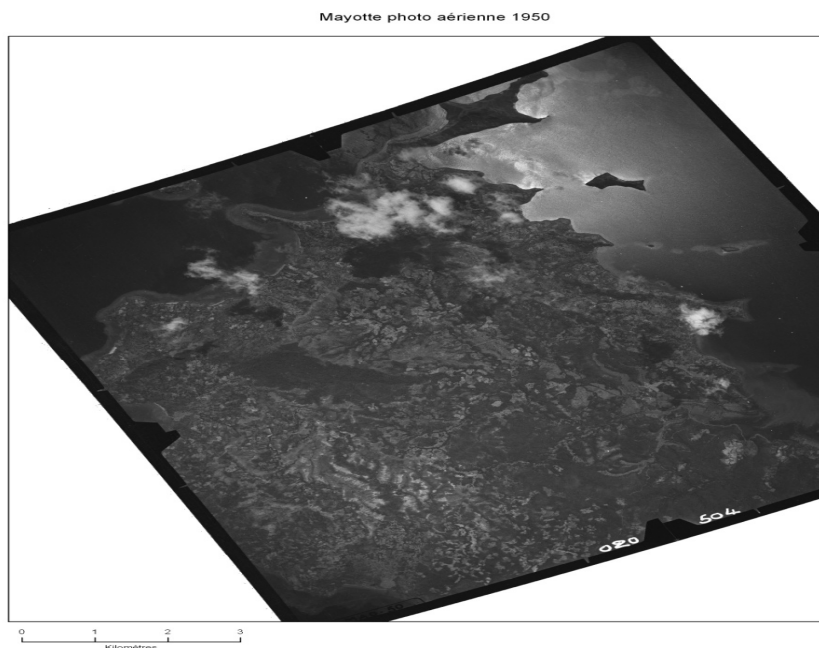


Figure 1 : Exemple de photographie aérienne noir et blanc de 1950

Cette zone reste représentative d'une situation héritée du traité de 1841 cédant Mayotte à la France. Prévoyant en effet que toute terre non mise en valeur depuis quatre ans faisait partie du domaine de l'Etat, ce traité allait à l'encontre des pratiques d'agriculture itinérante fondées sur une jachère de longue durée, mais correspondait de surcroît à une stratégie d'accaparament foncière (Hassani, 2009). Le bornage définitif des premiers lots de terrains affectés en réserves forestières en 1967, la mise en application du code forestier en 1992, de même que la régulation foncière entreprise par le CNASEA en 1994, mais aussi et surtout l'évolution démographique n'ont pu aplanir le front permanent des revendications foncières.

La zone d'étude est comprise entre les isohyètes 1700 et 1900 mm/an et est revêtue de sols ferralitiques dits tronqués ou remaniés sur altérites, qui deviennent très sensibles à l'érosion en padzas dans les situations en crête sous l'effet d'une pression anthropique exacerbée (Raunet, 1992). La forêt humide y dominait vraisemblablement avant la présence du peuplement humain (Pascal, 2002).

1.2. – Analyse diachronique

L'analyse s'est basée sur la comparaison d'une photo en noir et blanc (numérotée 504) tirée de la couverture aérienne de 1950, et des ortho-photos infra-rouges correspondantes réalisées en 2008 (figure ci-après). La photo de 1950 a préalablement été recalée par correction géométrique à partir d'une trentaine de points.

Les surfaces forestières de 1950 ont été identifiées par seuillage de la réflectance traduite par les grisés, en s'appuyant sur un nombre élevé de contrôles validant une telle démarche. Pour rendre les photos tout à fait superposables, les scans de 1950 ont été « repixelisés » de manière plus fine, de manière à s'appuyer dans les deux cas sur des pixels d'un mètre carré.

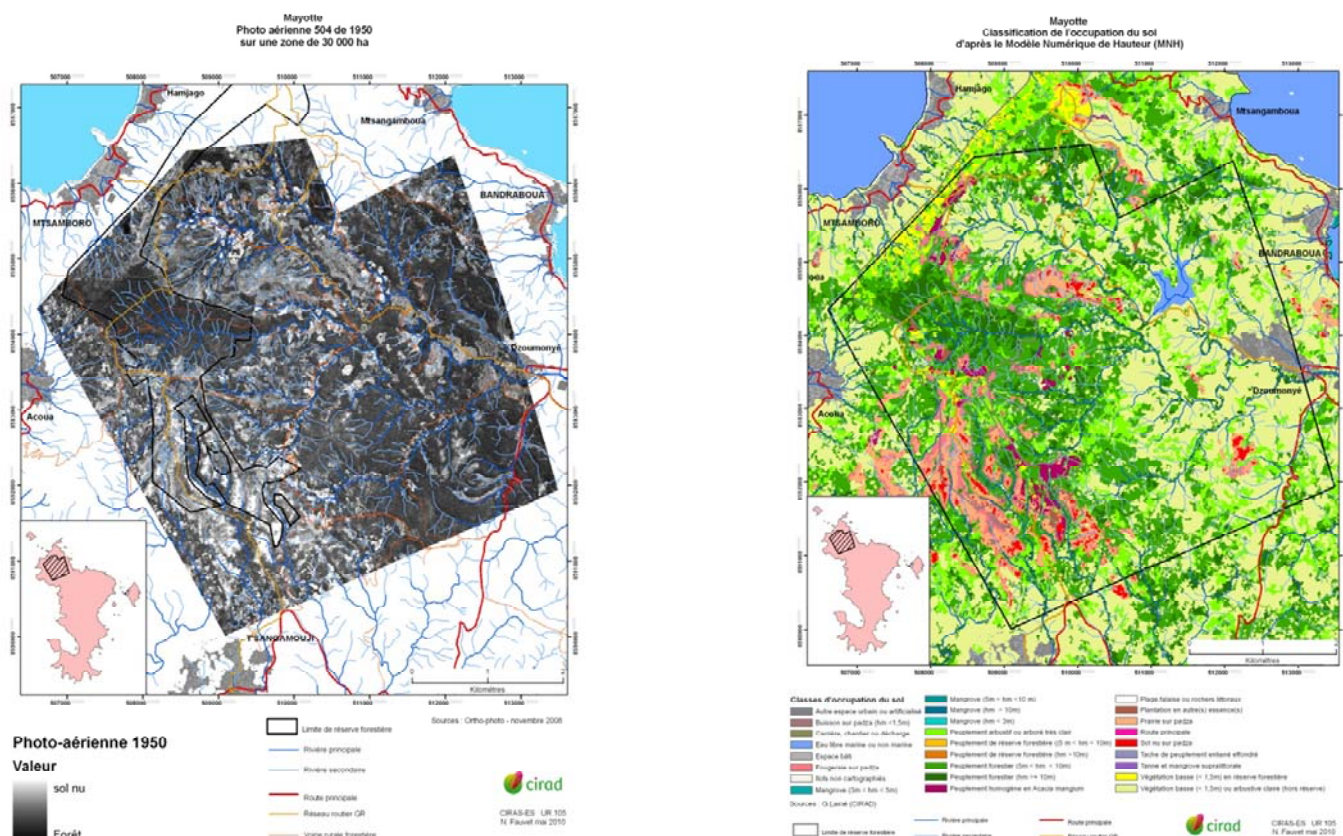


Figure 2 : Zone d'étude retenue

Pour chaque pixel des deux ensembles photographiques, deux classes ont dès lors été distinguées et affectées d'un numéro : 1 pour les espaces boisés en 1950, 1 pour les espaces boisés en 2008, et 0 pour les espaces non boisés identifiés en 1950 comme en 2008. La mise en œuvre d'une simple démarche additive a permis de distinguer les zones stables boisées ou non boisées, de même que les zones de progression ou de retrait forestier. Le tableau ci-dessus montre en effet qu'à chaque valeur finale, variant de 0 à 3, une seule trajectoire d'évolution est possible.

	bois	non-bois
1950	1	0
2008	2	0
Somme :	0	non-bois -> non-bois
	1	bois -> non-bois
	2	non-bois-> bois
	3	bois -> bois

Tableau 1: Démarche additive mise en œuvre

2. – Résultats

Les changements dans la distribution et les contours des surfaces boisées sont représentés par la figure de la page suivante. Les surfaces non forestières inchangées recouvrent 1478 ha (32,5 %), traduisant donc une occupation agricole pérenne d'environ un tiers de la surface représentée au sein de la zone considérée.

Classe	%
Non-forêt inchangé	32,5
Perte forêt	28,5
Gain forêt	18,5
Forêt inchangé	20,5

Tableau 2 : *Changements intervenus dans les surfaces forestières entre 1950 et 2008*

La perte des surfaces forestières est élevée (1293 ha, soit 28,5 %), tout particulièrement si on la confronte aux « gains forestiers » qui se révèlent nettement moins élevés (842 ha, soit 18,5 %). Le solde forestier reste négatif sur l'ensemble de cette zone est de 451 ha, soit 9,9 % de la surface totale. Les surfaces forestières inchangées représentent quant à elles 930 ha (20,5 %). Une remarque tout à fait majeure s'impose ici : le terme de « gains forestiers » comporte une dimension illusoire dans la mesure où, basé sur une simple appréciation surfacique cumulative, il occulte de fait la nature même des surfaces boisées acquises au cours de la période considérée. Or, les déplacements que nous avons réalisés sur le terrain au cours de nos différentes missions en 2009 et 2010 nous ont révélé, hors des réserves forestières, un état extrêmement fragmenté de la composante boisée.

Les valeurs globales de l'évolution des surfaces boisées de Mayotte doivent être considérées avec toute la prudence qui s'impose.

Il est en effet fondamental de considérer que par sa composition, mais aussi et surtout par les fonctions qu'il assure à l'échelle paysagère et les services environnementaux qu'il assure, un hectare cumulé de petites surfaces boisées en « timbres postes » présente une valeur environnementale bien moindre que pour un hectare situé au sein d'une réserve forestière ou en contiguïté directe de cette dernière.

Ces valeurs établies sur l'ensemble de la zone d'études occultent en outre de fortes disparités locales. La figure ci-après, qui reprend les évolutions observées, illustre très clairement l'influence des pôles d'urbanisation, dont les défrichements se présentent de manière radiale par rapport à chacun de ces centres (Mtsamboro, et surtout Bandraboua ou Dzoumonye). Les pertes forestières cartographiées s'appuient le plus souvent sur des zones déjà défrichées et maintenues en l'état. Elles suivent de surcroît les axes de pénétration (chemins, pistes, routes), qui correspondent le plus souvent aux espaces les moins pentus et donc aisément cultivables, mais elles viennent parfois s'adosser sur des reliefs plus accidentés.

Dans la Réserve forestière des Crêtes du Nord, la progression du couvert forestier l'emporte de loin sur les pertes, ces dernières n'étant apparentes que dans la bande Nord de la réserve.

Dans la zone des padzas qui prolonge la partie méridionale de la réserve, on observe un retour partiel des surfaces boisées dans sa partie centrale, mais la bordure occidentale laisse au contraire apparaître un recul forestier.

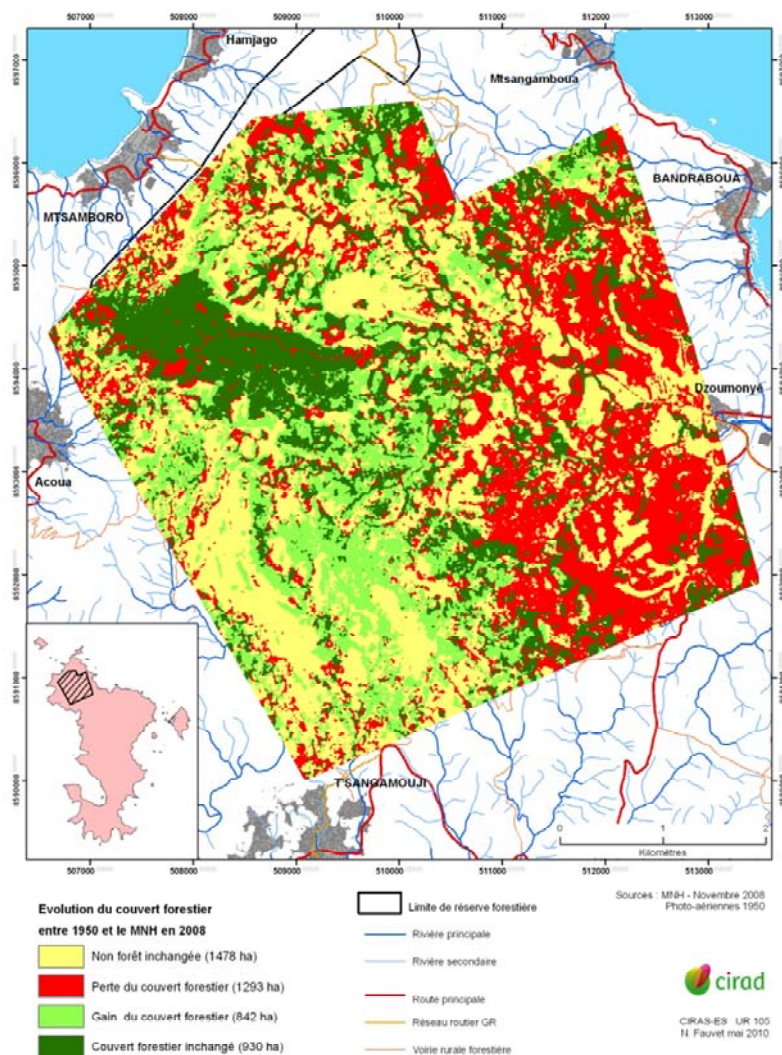


Figure 3 : Évolution du couvert forestier entre 1950 et 2008

Le padza situé au nord-est de Mlima Mapouera a quant à lui bénéficié d'une recolonisation de la végétation forestière sur l'ensemble de ses contours, à l'exception d'une petite zone sans sa partie orientale qui constitue au demeurant l'un des points ultimes du front de défriche forestière établi à partir du centre de Dzoumonyé.

Enfin, on observe l'enneigement des boisements préexistants à la mise en place de la retenue collinaire de Dzoumonyé.

3. – Eléments de discussion

Les résultats obtenus selon la démarche utilisée invitent à une mise en perspective d'ordre méthodologique (point 3.1), mais aussi socio-environnementale (points 3.2 à 3.4). Le premier

point que nous aborderons ici porte sur les limites qu'auraient induites l'utilisation d'un seuil de réflectance basé sur l'activité photosynthétique.

3.1. – Mise en défaut de l'utilisation du NDVI

Une approche alternative, si nous n'avions disposé de la cartographie numérique réalisée dans le cadre de ce projet, aurait en effet été d'utiliser un seuillage réalisé à partir des canaux rouge (R) et proche infra-rouge (PIR) de l'image, et de valoriser de ce fait les photographies en infrarouge couleurs dont nous disposions.

L'utilisation de l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) peut, dans ce type de démarche, s'envisager en recourant à la formule suivante :

$$NDVI = (PIR) - (R) / (PIR) + (R)$$
 distinction boisé / non-boisé avec un seuil à 0,2 (les valeurs supérieures correspondant à un état boisé).

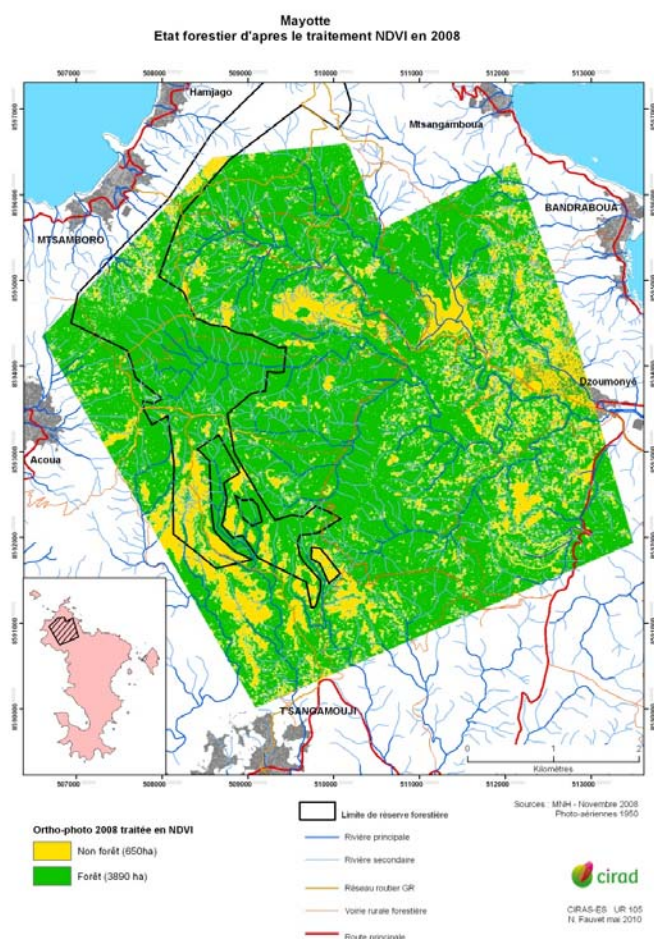


Figure 4 : Indice de végétation normalisé (NDVI) calculé à partir de l'orthophotographie de 2008

Cependant, la carte ci-contre détaillant sur cette base la délimitation des zones boisées (en vert) et non boisées (en jaune) révèle une large zone de confusion avec la végétation basse, le procédé basé sur la prise en compte d'un signal d'activité synthétique ne permettant pas, seul, de discriminer des unités de végétation différentes dans leur physionomie mais dont l'activité photosynthétique est similaire (ex : bois / cultures).

La cartographie réelle que nous avons produite dans ce projet montre, en nous y référant, que la simple utilisation de la réflectance pour étudier la dynamique paysagère d'une zone quelconque de Mayotte eût fourni des résultats erronés. Une telle constatation invite donc à considérer avec prudence des résultats qui auraient été antérieurement produits sur le territoire à partir de ce seul indice de végétation.

3.2. – Facteurs biologiques de reconquête forestière

L'analyse diachronique entreprise fait apparaître un recul forestier à proximité des centres urbains, positionnés en situation côtière, tandis que les zones plus centrales ont bénéficié d'une reprise forestière. Cette hétérogénéité spatiale des types de changements observés entre 1950 et 2008 répond à la mise en œuvre de processus antagonistes impliquant dans un sens la capacité de résilience élevée de la végétation indigène, servie par un cortège très efficaces de vertébrés disperseurs de semences, et dans un autre sens par une pression agricole qu'exacerbe la croissance démographique.

La fréquence des signes de défriche ancienne, que souligne par exemple la présence de *Nuxia pseudodentata* ou *Aphloia theiformis* au sein de peuplements forestiers matures où *Grisollea myrianthei* domine parfois, atteste que la forêt réunionnaise bénéficie d'une capacité de résilience élevée. Le modèle de la forêt réunionnaise, que caractérise au contraire sa très faible résilience, mais qui prévaut pourtant dans la communauté naturaliste locale, n'est pas applicable à Mayotte (Starsberg, comm. pers.). Cette résilience tient en partie à l'abondance et la diversité du cortège de vertébrés disperseurs qui bénéficie semble-t-il d'une pression de chasse peu élevée, ce dont témoignent les densités élevées de roussettes (*Pteropus seychellensis comorensis*) et de lémurins (*Eulemur fulvus fulvus*), mais aussi du caractère à la fois très commun et ubiquiste du bulbul noir (*Hypsipetes madagascariensis*).

Cette capacité de recolonisation naturelle d'espaces défrichés, que vient épauler le reboisement, est soulignée par le Plan d'Aménagement et de Développement Durable de Mayotte qui, dans une étude similaire, avait établi que les surfaces forestières avaient progressé de 73 % entre 1949 et 1987, puis régressé de 53 % entre 1987 et 2002 (PADD, 2004), ce qui correspond, si l'on s'en tient à ces données, à un taux d'accroissement des surfaces forestières entre ces deux dates égal à : $[(1 + 73) \times 0,47] - 1 = - 18,7 \%$. Dans notre zone d'étude, la tendance s'avère moins défavorable, en raison de la présence de la Réserve Forestière des Crêtes du Nord, en proportion supérieure à la part représentée par l'ensemble des réserves dans l'ensemble de Mayotte.

Si l'on tient compte (i) du taux de « décroissance forestière » observé, mais aussi (ii) de la fragmentation dont elle s'accompagne au sein des surfaces maintenues ou localement en progression hors réserves, nous pouvons donc affirmer que la situation dynamique actuelle des surfaces boisées à Mayotte est particulièrement préoccupante.

3.3. – Facteurs socio-économiques de recul de la forêt

A densité démographique constante, la réduction de la durée moyenne de la jachère à Mayotte, qui est passée de 10 ans en 1930 à 2 ans en 1993 (PADD, 2004), concourt en tant que telle à diminuer la dynamique de défriche forestière, en faveur de systèmes agroforestiers. En revanche, la pression démographique joue en faveur d'une extension de la mise en valeur agricole des sols.

Le pas de temps ici étudié correspond à une progression élevée des zones urbaines qui apparaît précisément exacerbée le long de la bande côtière nord-est de la Grande Terre. A l'échelle de Mayotte, le taux d'accroissement moyen annuel était de 4,9 % entre 1991 et 2002, mais atteignait 5,2 % à Dzoumonyé (PADD, 2004). La pression démographique qui en résulte apparaît de ce fait plus élevée à l'est : par exemple, le canton de Bandraboua abritait environ 9000 habitants en 2007, pour une population de 4600 individus dans le canton d'Acoua (INSEE, 2007).

De manière concomitante, la bande Est de Mayotte est le siège d'un marché foncier très actif (INSEE, 2008), en relation avec la monétarisation de l'économie, qui fait évoluer l'agriculture mahoraise vers des systèmes plus rémunérateurs, mais favorise également des schémas de spéculation foncière. Si le déclin des productions de rentes traditionnelles (vanille et *ylang-ylang*) et le délaissement de la cocoteraie du fait de la chute des prix du coprah sont significatifs, on observe un développement récent de parcelles de maraîchage, de bananiers ou de fruitiers en monoculture tournées vers le marché (Sourisseau et al., 2008).

3.4. – Une perte d'intégrité forestière ?

Comme nous l'avons mentionné plus haut, une appréciation exclusivement quantitative de l'évolution du couvert forestier à Mayotte demeurerait très incomplète, voire biaisée : le maintien des surfaces forestières peut masquer une dégradation de la composition, de la structure ou des fonctions des écosystèmes représentés.

La forte résilience de la forêt mahoraise montre que des surfaces anciennement défrichées peuvent se repeupler en faveur d'un cortège floristique doté d'une richesse spécifique élevé. Certaines espèces exotiques naturalisées comme le manguier (*Mangifera indica*) ou l'avocat marron (*Litsea glutinosa*), à condition toutefois que ce dernier ne soit pas traité et maintenu en taillis par les éleveurs, s'intègrent totalement dans les faciès forestiers indigènes, qui bénéficient de ce fait d'une structure verticale équilibrée. La difficulté de distinguer, dans une île où la composante agroforestière de l'agriculture est particulièrement élevée, l'état « naturel » de l'état « cultivé » (PADD, 2004), atteste de l'intérêt d'envisager l'ensemble de la composante ligneuse mahoraise comme un continuum.

A ce titre, il apparaît prometteur, pour les gestionnaires des espaces naturels de Mayotte, de recourir à des indices d'écologie paysagère (notamment de fragmentation forestière), non mobilisés dans le cadre de cette étude, mais qu'autorise désormais la mise à disposition de notre cartographie numérique basée sur la structure de la végétation.

De notre point de vue, la question majeure reste celle du maintien des fonctions des écosystèmes forestiers ou agroforestiers et, plus globalement, de l'assurance des services écosystémiques assurés par les espaces dominés par la végétation ligneuse. Des investigations dans ce sens pourraient constituer l'un des volets les plus pertinents d'une recherche en écologie forestière à Mayotte.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .

- AIDE, T.M., ZIMMERMAN, J.K., HERRERA, L., ROSARIO, M. & SERRANO M. (1995).– Forest recovery in abandoned tropical pastures in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 77: 77-86.
- BOCQUET, A., CHAMBREY C., DERROIRE G. & TASSIN J. (2007).– Modes de colonisation de la savane arborée par des plantes de forêt tropicale sèche en Nouvelle-Calédonie. *Revue d'Ecologie (Terre Vie)* 62: 87-91.
- GUARIGUATA, M.R., CHAZDON, R.L., DENSLOW, J.S., DUPUY, J.M. & ANDERSON, L. (1997).– Structure and floristics of secondary and old-growth forest stands in lowland Costa Rica. *Plant Ecology*, 132: 107-120.
- HASSANI M. (2009). *Les occupations agricoles coutumières en zones de réserves forestières*. Mémoire de Licence Professionnelle. Université de Strasbourg, 42 p.
- HOLL, K.D. (1998).– Do bird perching structures elevate seed rain and seedling establishment in abandoned tropical pasture? *Restoration Ecology*, 6: 253-261.
- JUSTINIANO, M.J. & FREDERICKSEN, T.S. (2000).– Phenology of tree species in Bolivian dry forests. *Biotropica*, 32: 276–281.
- PADD (2004). Plan d'Aménagement et de Développement Durable de Mayotte. Conseil Général, Mamoudzou, 113 p.
- PASCAL O. (2002).– Plantes et forêts de Mayotte. MNHN, DAF Mayotte, Paris, 108 p.
- RAUNET M. (1992).– Les facteurs de l'érosion des terres et de l'envasement du lagon. Direction de l'Agriculture de Mayotte, Cirad-ca, Montpellier, 68 p.
- RUIZ, J., FANDIÑO, M.C. & CHAZDON, R.L. (2005).– Vegetation structure, composition, and species richness across a 56-year chronosequence of dry tropical forest on Providencia Island, Colombia. *Biotropica*, 37: 520-530.
- SOURISSEAU J-M., BONNAL, P. & BURNOD P. (2008).– Changement institutionnel et agriculture à Mayotte, *Économie rurale* 1/2008 (n° 303-304-305), p. 60-74.
- VIEIRA, D.L.M. & SCARIOT, A. (2006).– Principles of natural regeneration of tropical dry forests for restoration. *Restoration Ecology*, 14: 11-20.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. – Un produit cartographique à caractère innovant

La cartographie numérique produit présente un caractère innovant, ceci à trois titres principaux :

- elle dresse pour la première fois un état de référence des espaces naturels terrestres de Mayotte à un niveau élevé de résolution spatiale ;
- elle constitue le premier état cartographique de Mayotte qui prend en compte la hauteur de la végétation ;
- elle représente un support évolutif fin et pertinent pour la gestion des espaces, du fait qu'il est basé sur la structure de la végétation.

Ce produit vient confirmer l'intérêt de recourir à une approche structurale objective basée sur l'utilisation du MNH, dans la mesure où :

- il constitue un état des lieux objectif appelé à d'ultérieures mises à jour et à un suivi comparatif dans le temps ;
- il s'affranchit des effets perturbateurs liés aux effets d'ombrage et à l'impact des paramètres saisonniers sur la radiométrie (hauteur du soleil, état phénologique, pluviométrie) ;
- il privilégie la structure à la composition.

Il offre en particulier la possibilité de calibrer des modèles intégrant la classification retenue, afin de quantifier des services ou des risques environnementaux (ex : fixation du carbone, régulation hydrique et préservation des ressources en eau, sensibilité aux feux ou à l'érosion).

En outre, la démarche déployée pour parvenir à ce produit (notamment les relevés effectués sur le terrain, mais aussi le diagnostic d'évolution d'une zone donnée dans le Nord de l'île entre 1950 et 2008) montrent que la forêt mahoraise demeure à la fois hautement résiliente et singulière.

Le produit réalisé revêt diverses potentialités :

- c'est un outil fin et évolutif susceptible d'accompagner et de légitimer la prise de décisions relevant de la gestion forestière ;
- c'est une cartographie de l'ensemble de la végétation mahoraise, dont disposent désormais l'ensemble des gestionnaires des espaces, y compris en dehors des réserves forestières ;
- c'est une base de données cartographiques fines permettant la mise en œuvre d'études thématiques relevant de l'écologie du paysage ;

- c'est un ensemble cartographié de données de structure qui peut être mis en relation avec d'autres données thématiques (ex : éléments historiques relatifs à l'évolution de la végétation, distribution spatiale et suivi de taxons faunistiques) ;
- c'est une base d'études qui peut être aisément utilisée pour identifier les termes d'études plus fines relatives à des postes typologiques particuliers (ex : mangroves).

2. – Un outil évolutif de gestion forestière

L'étude cartographique réalisée devrait permettre de définir les bases d'une véritable politique forestière. Elle permet d'aborder désormais la variabilité spatiale de la structure de la végétation au sein des réserves forestières, et de disposer dès lors de la possibilité de définir et de spatialiser des orientations susceptibles de s'apparenter aux Orientations Régionales Forestières (ORF). Celles-ci relèveront de thématiques aussi diverses que les actions de conservation, la gestion et l'écoulement des produits ligneux (filière bois), le traitement de zones érodées, les interventions dans les zones enliénées et les actions de restauration écologique au sein des zones effondrées.

La structure constitue en effet un bon indicateur de l'état de la végétation, et notamment de son stade d'évolution au sein des successions forestières en place, mais aussi, dans une certaine mesure, des grands traits de sa composition (nous avons notamment montré que certaines espèces s'avéraient spécifiques d'une classe donnée, sur la base de notre jeu de relevés).

La mise à disposition du MNH que nous avons produit permettra également, aussi souvent que nécessaire, de diagnostiquer plus finement des situations particulières à l'intérieur de chacun des postes typologiques identifiés.

Au-delà des perspectives relevant de la gestion forestière habituelle, nous souhaitons alerter les gestionnaires sur la situation extrêmement préoccupante de l'enliénement qui, s'agissant des invasions biologiques terrestres à Mayotte, demeure à nos yeux la priorité n°1.

Selon une approche relevant de l'écologie du paysage, il nous paraît en outre souhaitable d'appréhender les îlots hors réserves (autre ceux qui sont en contiguïté directe de ces dernières comme cela a été cartographié) en relation avec les réserves forestières elles-mêmes. Une approche contrainte par les limites administratives nous apparaît en effet moins judicieuse qu'une démarche relevant de l'échelle biophysique du paysage.

Les *forêts de protection*, pour lesquelles des réflexions sont en cours, nous apparaissent comme une excellente opportunité pour mettre en œuvre une telle approche relevant de l'écologie du paysage. Il y a notamment lieu d'articuler les réflexions sur ces forêts de protection et la mise en place d'un Schéma Directeur de l'Aménagement Agricole et Rural (SDAAR) de Mayotte. L'étude réalisée au titre de la phase 2 montre en outre un recul forestier inhérent à une forte dynamique de défrichement, pour laquelle une politique de mise en protection plus ou moins stricte selon les situations, nous paraît devoir s'imposer.

Nous souhaitons revenir ici sur la résilience élevée de la forêt humide mahoraise, qui tient au moins en partie :

- de la plasticité exceptionnelle d'espèces colonisatrices indigènes, au premier rang desquelles figure *Grisollea myrianthea* ;
- de l'abondance de vertébrés disperseurs de taille relativement élevée (lémuriens, roussettes, pigeons) ;
- du nombre très peu élevé d'espèces végétales invasives, à l'exception de l'avocat marron (*Litsea glutinosa*) dont il faut toutefois considérer que la dominance spatiale est liée à un entretien en taillis de la part des éleveurs.

Cette résilience permet à la forêt mahoraise, contrairement à ses voisines réunionnaise ou mauritienne, de mettre en place rapidement, et de manière complète, des processus de succession secondaire après ouverture du milieu. Nous avons été particulièrement surpris de découvrir des faciès forestiers mûres développés sous couvert de vieux *Nuxia pseudodentata*, de manguiers ou même d'avocats marrons. La forêt mahoraise demeure donc aujourd'hui capable de réinvestir des milieux autrefois défrichés.

Pour autant, les données chiffrées relativement élevées des surfaces ne doivent pas occulter la réalité. D'une part, ces valeurs résultent pour partie du niveau de cartographie très fin que nous avons adopté (1500 m² pour les formations de plus de 5 m de hauteur). D'autre part, ces valeurs cumulées ne rendent pas compte du caractère extrêmement morcelé de la situation forestière telle qu'elle se présente hors réserves. Comme nous l'avons déjà précisé, ces fragments boisés « en timbres postes », qui contribuent à donner à Mayotte un visage très arboré, assurent des fonctions et des services écologiques bien moindres qu'au sein des forêts.

3. – Autres perspectives d'utilisation de l'outil

A l'occasion de la restitution de notre étude assurée le 22 juin 2010 au Conseil Général et de divers entretiens obtenus le lendemain auprès de divers responsables administratifs, nous avons pu identifier, au-delà du seul domaine forestier, diverses perspectives d'utilisation de l'outil proposé.

L'intégration des données produites par le projet dans le prochain SDAAR nous paraît représenter une forme de valorisation intéressante. Elle vient en appui d'une démarche selon laquelle l'agriculture n'est plus envisagée par défaut, mais est intégrée aux Plans Locaux d'Urbanisme (PLU). L'outil mis à disposition par notre projet peut assurer à ce titre une fonction de filtre permettant d'identifier des espaces pour lesquels la mise en valeur agricole :

- n'est pas souhaitable (ex : fortes pentes, reliques forestières),
- nécessite d'obéir à un cahier des charges (ex : au-delà d'un seul de densité des micro-boisements) ;
- justifie d'opérations d'appui particulières (ex : zones pour lesquelles l'agroforesterie est encore pratiquée en tant que telle).

La typologie produite vient en outre compléter les actions entreprises dans le cadre de la révision actuelle du Plan d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) de Mayotte.

Sur un autre plan, on relève des perspectives d'utilisation d'ores et déjà identifiées comme suit :

- valorisation dans le cadre d'une étude sur les mangroves en cours d'achèvement (DAF) ;

- diagnostic de l'état des ripisylves, d'intérêt environnemental majeur mais exposées à une pression de défrichement ;
- étude prévue en fin d'année 2010 sur les populations de makis, réalisée par un expert du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) ;
- consultation sur les espèces exotiques invasives, proposée au Conservatoire Botanique National de Mascarin (CBNM) en fin d'année 2010.

Au-delà de telles perspectives, nous espérons que la diffusion de ce produit, relayée par le Club SIG, fera naître de nouveaux besoins. En position relativement centrale, la cartographie numérique aujourd'hui délivrée aux partenaires devrait permettre une articulation optimale des réflexions, des actions et des aménagements engagés par les différentes institutions mahoraises intervenant dans la gestion des milieux.

Ainsi, qu'il s'agisse de gestion forestière ou d'exploitation agricole, les données cartographiques obtenues dans le cadre de ce projet pourront dans un premier temps être combinées avec différents paramètres (altitude, pente, exposition.) dérivés des produits disponibles ou avec des indicateurs pertinents issus de leur analyse spatiale (accessibilité, variabilité de la taille des îlots boisés etc.). Il nous apparaît en particulier nécessaire de détailler les liens esquissés entre structure, dynamique et composition floristique.

Enfin, l'intérêt de l'état des lieux réalisé est également de pouvoir être fréquemment mis à jour avec les données de télédétection à très haute résolution spatiale. Ces images peuvent être acquises à tout moment sur simple programmation sans attendre plusieurs années comme c'est le cas pour les couvertures aériennes régulières.

Les premiers essais réalisés en matière de dynamique d'occupation du sol ont en particulier montré, outre la détection rapide des changements, les potentialités offertes pour une analyse spatiale des évolutions (évaluation du mitage ou du grignotage des zones boisées, des ripisylves, suivi des replantations...).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement Daniel LESUR, Chef du Service des Ressources Forestières (SRF) de la Direction de l'Agriculture et des Ressources Terrestres et Maritimes (DARTM) du Conseil Général de Mayotte, pour nous avoir grandement facilité les déplacements sur le terrain ainsi que pour les nombreux échanges sur ce projet qui nous ont permis d'en préciser les attendus ainsi que les détails techniques nécessaires à son avancement.

Les déplacements sur le terrain ont été assurés avec la précieuse assistance de Ali ANDY (adjoint au Chef de service), Naïlane Attoumani ATTIBOU (BEA, Chef de bureau), Mohamed HASSANI (BEA), Pauline PRÉVÔT (BEA), Mohamed DAOUDA (Chef de bureau 'Gestion et Surveillance Forestière'), CHANRANI Soidri (Chef de Bureau « Plants et Travaux Forestiers »), ABDILLAH Souffou (Agent Technique Forestier), ABDOU Kassim (Agent Technique Forestier), AHAMADI Sinani (Agent Technique forestier), DAOUDOU Sanda (Agent Technique Forestier), HAMADA Ali (Chef d'équipe secteur Sud), HOUSSAMOUDINE Amissi (Agent Technique SRF), IBRAHIM Abdulkahim (Agent Technique SRF), MAOULIDA Issoufi (Agent Technique SRF), MCHANGAN Maoulida (Botaniste DAF), MOUHAMADI Abdallah (Agent Technique SRF), MOURIDI Ahmed (Chef d'équipe secteur Nord), QUITTABI Abdoulatif (Agent technique Forestier) SIFARI Ali Bacar (Botaniste DAF), Ahamadi SINANI (Agent Technique Forestier) que nous remercions tous chaleureusement.

Nous exprimons également toute notre reconnaissance à Jacques GRELOT (responsable de l'UTG du FED) pour la mise à disposition régulière d'un véhicule tout-terrain ainsi qu'à Bénédicte HEALY chargée de projets ruraux à l'UTG du FED, qui par son attention permanente a largement contribué au bon déroulement des différentes missions et des différentes phases de l'étude.

Nous adressons notre gratitude à Danny LAYBOURNE, Chef du Service Environnement et Forêt (SEF) de la DAF pour la possibilité qui nous a été donnée de bénéficier de l'aide sur le terrain des deux agents botanistes du service, MCHANGAN Maoulida (dit Mao) et SIFARI Ali Bacar (dit Bako), à Sean HEALY, chef du service d'Information Statistique et Economique (SISE) de la DAF pour les données qui ont été mises à notre disposition ainsi qu'à Caroline CREMADES (chargée de mission mangroves) et Sébastien AUBARD (responsable SIG) pour les échanges fructueux qui en ont résulté.

Nous remercions Bernard DOLACINSKI, Délégué du CIRAD, ainsi que Jean-Paul DANFLOUS et Fatima SAIDOU (Cirad) qui ont facilité l'ensemble de nos séjours (organisation, réservations), dans leur programmation comme dans leur déroulement (appui logistique, mise à disposition de la salle de réunion, dépannages impromptus !).

Nous remercions également Jean-Claude LORENTE (Cirad/Umr Tetis) pour son expertise concernant l'édition des plaquettes et des cartes A0 ainsi qu'Annie DESBROSSE (Cirad/Umr Tetis) pour ses classifications exploratoires.

Merci également à Naïlane Attoumani ATTIBOU, à Pauline PREVOT et à Mohammed HASSANI pour leur accueil et la mise à disposition de leur bureau pendant les deux semaines de formation.

Enfin, nous avons été sensibles aux remarques et propositions de l'ensemble des membres du Comité Technique au cours duquel ont été validées les options prises depuis le début de l'étude, de celles des participants aux différentes réunions d'information qui se sont tenues à Mamoudzou et à Coconi ainsi que lors de la mission finale de restitution au Conseil Général que nous remercions pour la mise à disposition de l'hémicycle le 22 juin 2010.